

METHOD FOR FORMATION OF POLARIZATION INVERTED STRUCTURE AND PRODUCTION OF WAVELENGTH CONVERTING DEVICE USING THE SAME

Patent Number: JP2001066652

Publication date: 2001-03-16

Inventor(s): SUGITA TOMOYA; MIZUUCHI KIMINORI; YAMAMOTO KAZUHISA

Applicant(s): MATSUSHITA ELECTRIC IND CO LTD

Requested Patent: JP2001066652

Application Number: JP19990242278 19990827

Priority Number(s):

IPC Classification: G02F1/37

EC Classification:

Equivalents:

Abstract

PROBLEM TO BE SOLVED: To prevent fracture in a crystal when an electric field is applied and to form a thick polarization inverted structure having a high aspect ratio by including a process for the formation of polarization inverted structure to apply a pulse electric field on a ferroelectric crystal substrate twice or more times to form a polarization inverted structure in the ferroelectric crystal substrate, and other processes.

SOLUTION: The insulating film 4 is formed to several 100 to 3000 &angst thickness which is enough thick than the thickness of a comb-like electrode 2 and an electrode 3. The comb-like electrode 2 and the electrode 3 are easily obtained by forming a Ta thin film on the surface of a MgO; LN crystal substrate 1 by vapor deposition or sputtering and by using a photolithographic process and an etching process or a lift-off process. The insulating film 4 can be also easily formed by sputtering or the like. By applying an electric field on the MgO; LN crystal substrate 1 by using a power supply 5 through the comb-like electrode 2 and the electrode 3 thus formed, the polarization inverted structure 6 is formed.

Data supplied from the esp@cenet database - I2

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2001-66652

(P2001-66652A)

(43)公開日 平成13年3月16日 (2001.3.16)

(51)Int.Cl.⁷

G 0 2 F 1/37

識別記号

F I

G 0 2 F 1/37

テ-マコ-ト(参考)

2 K 0 0 2

審査請求 未請求 請求項の数26 O L (全 23 頁)

(21)出願番号 特願平11-242278

(22)出願日 平成11年8月27日 (1999.8.27)

(71)出願人 000005821

松下電器産業株式会社

大阪府門真市大字門真1006番地

(72)発明者 杉田 知也

大阪府門真市大字門真1006番地 松下電器
産業株式会社内

(72)発明者 水内 公典

大阪府門真市大字門真1006番地 松下電器
産業株式会社内

(74)代理人 100078282

弁理士 山本 秀策

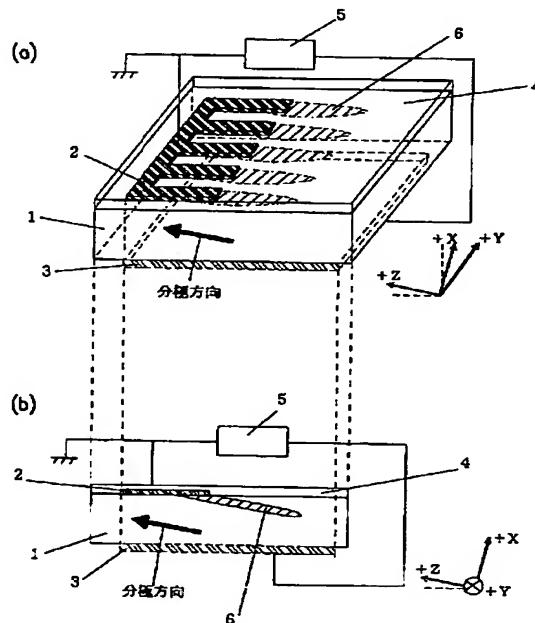
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 分極反転構造の形成方法並びにそれを利用した波長変換素子の製造方法

(57)【要約】

【課題】 電界印加により強誘電体中に分極反転構造を形成する方法において、電界印加時の結晶破壊を防止しながら高アスペクト比を有する厚い分極反転構造の形成を可能にする、分極反転構造の形成方法を提供する。

【解決手段】 分極反転構造の形成方法が、対向する第1及び第2の主面を有し且つ該第1及び第2の主面にはほぼ平行な方向に單一分極化された強誘電体結晶基板の、該第1の主面に第1の電極を形成する、第1電極形成工程と、該強誘電体結晶基板の該第2の主面に第2の電極を形成する、第2電極形成工程と、該第1及び第2の電極に接続された電界印加手段を用いて、該第1及び第2の電極を介して該強誘電体結晶基板にパルス電界を2回以上にわたって印加して、該強誘電体結晶基板の内部に分極反転構造を形成する分極反転形成工程と、を含む。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 対向する第1及び第2の主面を有し且つ該第1及び第2の主面にはほぼ平行な方向に單一分極化された強誘電体結晶基板の、該第1の主面に第1の電極を形成する、第1電極形成工程と、該強誘電体結晶基板の該第2の主面に第2の電極を形成する、第2電極形成工程と、該第1及び第2の電極に接続された電界印加手段を用いて、該第1及び第2の電極を介して該強誘電体結晶基板にパルス電界を2回以上にわたって印加して、該強誘電体結晶基板の内部に分極反転構造を形成する分極反転形成工程と、を含む、分極反転構造の形成方法。

【請求項2】 前記第2の電極の面積が、少なくとも前記第1の電極の面積よりも大きく、該第2の電極の少なくとも一部が、該第1の電極を前記第2の主面へ前記強誘電体結晶基板の厚さ方向に投影したときの投影領域よりも該強誘電体結晶基板の-C軸側に位置している、請求項1に記載の分極反転構造の形成方法。

【請求項3】 対向する第1及び第2の主面を有し且つ該第1及び第2の主面にはほぼ垂直な方向に單一分極化された強誘電体結晶基板の、+C軸側に位置する該第1の主面に第1の電極を形成する、第1電極形成工程と、該強誘電体結晶基板の-C軸側に位置する該第2の主面に第2の電極を形成する、第2電極形成工程と、該第1及び第2の電極に接続された電界印加手段を用いて、該第1及び第2の電極を介して該強誘電体結晶基板にパルス電界を2回以上にわたって印加して、該強誘電体結晶基板の内部に分極反転構造を形成する、分極反転形成工程と、を含み、該第2の電極の面積が、少なくとも該第1の電極の面積よりも大きく、該第2の電極が、該第2の主面において、該第1の電極を該第2の主面へ該分極方向に投影したときの投影領域を含まないように配置されている、分極反転構造の形成方法。

【請求項4】 前記第2電極形成工程が、前記第2の電極と前記強誘電体結晶基板との間に中間絶縁膜を形成する工程を含み、前記分極反転形成工程では、前記第1及び第2の電極と更に該中間絶縁膜を介して、該強誘電体結晶基板に前記パルス電界を印加する、請求項1から3の何れか一つに記載の分極反転構造の形成方法。

【請求項5】 前記第1の電極が、2つ以上のお互いにはほぼ平行な電極列から構成されており、該ほぼ平行な電極列の間の間隔が200μmより大きい、請求項1から4の何れか一つに記載の分極反転構造の形成方法。

【請求項6】 前記第1の主面の上に、前記第1の電極とほぼ平行に配置されているが該第1の電極から電気的に絶縁されているストライプ状の導電性膜を形成する工

程を更に含む、請求項1から5の何れか一つに記載の分極反転構造の形成方法。

【請求項7】 前記第1の電極が、2つ以上のお互いにはほぼ平行な電極列から構成されており、前記ストライプ状の導電性膜は、その一部が該第1の電極を構成する各電極列の間に位置するように配置されている、請求項6に記載の分極反転構造の形成方法。

【請求項8】 前記第1の電極と前記ストライプ状の導電性膜との間隔が、200μmより大きい、請求項6或いは7に記載の分極反転構造の形成方法。

【請求項9】 前記第1の電極を含む前記強誘電体結晶基板の表面を少なくとも覆うように、第1の絶縁膜を形成する工程を更に含み、前記分極反転形成工程では、前記第1及び第2の電極と更に該第1の絶縁膜を介して、該強誘電体結晶基板に前記パルス電界を印加する、請求項1から8の何れか一つに記載の分極反転構造の形成方法。

【請求項10】 前記第1の電極が、少なくとも一部に尖塔部が設けられた形状を有しており、前記分極反転形成工程では、該尖塔部より前記分極反転構造が形成される、請求項1から9の何れか一つに記載の分極反転構造の形成方法。

【請求項11】 前記分極反転構造が、周期状形状を有しており、前記第1の電極が、形成される該分極反転構造の該周期状形状に対応する周期状パターンを有する電極である、請求項1から10の何れか一つに記載の分極反転構造の形成方法。

【請求項12】 前記周期状パターンを有する電極が櫛形電極である、請求項11に記載の分極反転構造の形成方法。

【請求項13】 前記周期状パターンを有する電極の前記周期状パターンの長手方向の長さLが、40μm≤L≤500μmである、請求項11或いは12に記載の分極反転構造の形成方法。

【請求項14】 前記第1の電極及び前記第2の電極が、その抵抗率が $1.0 \times 10^{-7} \Omega \text{m}$ 以下の材料から形成されている、請求項1から13の何れか一つに記載の分極反転構造の形成方法。

【請求項15】 前記ストライプ状の導電性膜が、その抵抗率が $1.0 \times 10^{-7} \Omega \text{m}$ 以下の材料から形成されている、請求項6から8の何れか一つに記載の分極反転構造の形成方法。

【請求項16】 前記第1の電極及び前記第2の電極の各々の抵抗値が、測定位置に依存せずに200Ω以下である、請求項1から13の何れか一つに記載の分極反転構造の形成方法。

【請求項17】 前記ストライプ状の導電性膜の抵抗値が、測定位置に依存せずに200Ω以下である、請求項6から8の何れか一つに記載の分極反転構造の形成方

法。

【請求項18】前記分極反転形成工程において、前記パルス電界のパルス幅が20ms以下である、請求項1から17の何れか一つに記載の分極反転構造の形成方法。

【請求項19】前記分極反転形成工程において、前記パルス電界の立ち上がり速度が5kV/ms以上である、請求項1から18の何れか一つに記載の分極反転構造の形成方法。

【請求項20】前記分極反転形成工程において、前記パルス電界の繰り返し印加間隔が30ms以上である、請求項1から19の何れか一つに記載の分極反転構造の形成方法。

【請求項21】前記強誘電体結晶基板が、LiNbO₃結晶基板、或いは、MgO、Zn、Scの何れかをドープしたLiNbO₃結晶基板である、請求項1から20の何れか一つに記載の分極反転構造の形成方法。

【請求項22】前記強誘電体結晶基板が、液相成長により形成された強誘電体結晶膜を含む、請求項1から20の何れか一つに記載の分極反転構造の形成方法。

【請求項23】強誘電体結晶基板の中に形成された周期状の分極反転構造を有する波長変換素子の製造方法であって、

該分極反転構造を、請求項1から22の何れか一つに記載の分極反転構造の形成方法によって形成する工程を含む、波長変換素子の製造方法。

【請求項24】強誘電体結晶基板の中に、周期状の分極反転構造を形成する工程と、

該強誘電体結晶基板の中に、該周期状の分極反転構造をほぼ垂直に横切る方向に、光導波路を形成する工程と、を少なくとも含む波長変換素子の製造方法であって、該分極反転構造を、請求項1から22の何れか一つに記載の分極反転構造の形成方法によって形成する、波長変換素子の製造方法。

【請求項25】前記分極反転構造は、前記強誘電体結晶基板の上に該分極反転構造に対応するパターンを有するように形成された電極を用いて形成され、前記光導波路は、該電極が形成された領域以外の部分に形成される、請求項24に記載の波長変換素子の製造方法。

【請求項26】前記光導波路と、前記分極反転構造に対応するパターンを有する電極の電極指の先端との間の距離が、10μm以下である、請求項25に記載の波長変換素子の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、強誘電体結晶基板中に分極反転構造を形成する際に、任意の領域に均一な分極反転領域を形成することができる分極反転構造の形成方法に関する。特に、本発明は、強誘電体結晶のXカット基板、Yカット基板、及びオフカット基板におい

て、基板の厚さ方向に厚い分極反転領域を形成することができる分極反転構造の形成方法に関する。更に、本発明は、上記の分極反転構造の形成方法を利用して形成した周期状の分極反転構造を有する、波長変換素子の製造方法に関する。

【0002】

【従来の技術】強誘電体材料は、絶縁性及び高誘電率を持つことに加えて、自発分極の反転という現象を生じる。分極反転構造は、強誘電体結晶特性の制御を可能にする現象であって、この分極反転現象を利用することによって、光スイッチ、光偏光器、表面弾性波デバイス、焦点素子、非線形光学デバイス等、多くの分野への応用が可能である。

【0003】この分極反転現象を利用したデバイスの一つとして、波長入のレーザ光を入射させて波長入/2の出力光を得る波長変換素子（以下、「SHG素子」と呼ぶ）がある。SHG素子の開発に関して、これまで様々なアプローチがなされてきた。

【0004】例えば、強誘電体結晶であるLiNbO₃やLiTaO₃に周期状の分極反転構造を形成して擬似的に位相整合状態（基本波の位相速度と第2高調波の位相速度とが等しい状態）を作ることによって、高効率の波長変換が達成できることが報告されている。このSHG素子においては、出射光波長に見合った周期を有する周期状の分極反転構造を形成することが必要であり、出力波長として例えば波長400nm～450nmの青色光を得る場合には、分極反転周期として約3μm程度のものが必要である。また、完全に位相整合をとるために均一な周期を有する分極反転構造を形成するということが重要である。

【0005】一方、更に高効率の波長変換を行うために、光導波路型のSHG素子も提案されてきている。これは、光の伝搬方向に周期状の分極反転構造を形成するものであり、光導波路内に光を閉じ込めて、バルク型のSHG素子よりもはるかに高効率の波長変換が達成される。光導波路型SHG素子では、光閉じ込めによる高効率化のために、光導波路内を伝搬する導波光と分極反転部との十分なオーバーラップを図ることが重要であり、光導波路の断面方向での分極反転構造の大きさが、光導波路の断面よりも大きくなることが望ましい。

【0006】強誘電体材料、特に強誘電体結晶基板中に分極反転領域を形成する有効な方法の一つとして、基板表面に周期状の分極反転構造に対応するパターンを持つ接触電極を作製し、高真空中或いは不活性絶縁液中で電界を印加する方法が提案されている。具体的には、特開平2-187735号公報、特開平3-121428号公報、及び特開平4-19719号公報などにおいて、強誘電体結晶基板のドメイン制御方法（分極反転構造の形成方法）が提案されている。これらの方法は、主にZ

カット基板に対する分極反転構造の形成方法に関しており、具体的には、單一分極化された強誘電体結晶を挟んで対向する両主面 (+C 及び -C 面) に、対向する一对の電極 (電極対) をそれぞれ配置し、その電極対の間に直流電圧を印加することによって局部的に分極反転部分を形成して、周期状の分極反転構造を得る。上記のうちで特開平4-19719号公報では、数100°C~1200°Cの雰囲気中で直流電界或いはパルス電界の印加を行うことにより、強誘電体材料の抗電界を減じる方法が提案されている。

【0007】また、特開平5-210132号公報では、面内方向に單一分極化されたLiNbO₃結晶基板に分極反転構造を形成する分極反転構造の形成方法が提案されており、ここでは、基板の同一主面上の分極方向に7 μm~200 μmの間隔で対向電極対を配置し、15 kV以上/mmの電圧によって電界を印加する方法、及び、これらの条件下で2つ以上のパルス電界を印加する方法が提案されている。

【0008】更に、特開平9-218431号公報では、強誘電体結晶基板に厚い分極反転構造を形成して高効率の波長変換を行う手段として、オフカット基板、すなわち、強誘電体結晶の自発分極の向きに対して角度θ (0° < θ < 90°) をなす面でカットした基板を用いた、光導波路型波長変換素子が提案されている。具体的には、オフカット基板の同一主面或いは分極方向と平行な方向に所定パターンを有する電極を配置し、外部から電場を印加して、周期的分極反転部を形成するという方法が示されている。

【0009】

【発明が解決しようとする課題】しかし、上述の従来の分極反転構造の形成方法において、強誘電体結晶のXカット基板やYカット基板、或いはオフカット基板に分極反転構造を形成する場合には、同一主面内に電極対を形成するために、高電圧の電界を印加する際に結晶破壊が生じることがある。

【0010】また、従来技術によれば、分極反転部の反転幅 (周期状の分極反転構造をなす各分極反転部分の周期方向広がり) が電極の線幅よりも大きく形成されるために、分極反転部の幅を正確に制御することができず、従って、分極反転部のアスペクト比 (各分極反転部分の周期方向広がりWと分極反転部の厚さdとの比d/W) が小さくなるという課題がある。例えば、Xカット基板においては、反転幅W=1.5 μmに対して反転厚さd=0.5 μm程度にしかならない。このため、例えば、光導波路型波長変換素子において光導波路の厚さを2 μm程度とする場合、光導波路の断面に対して周期状の分極反転構造が充分に形成されずに、変換効率の低下の原因となる。特に、Xカット基板やYカット基板においては、同一主面内に電極対を形成するため、厚い分極反転構造を形成することが困難であり、厚い周期状の分極反

転構造を形成することが課題である。

【0011】また、従来の方法には、所望の分極反転周期が3~4 μm程度と短い場合に、分極反転構造の形状が不均一になるという課題も存在する。

【0012】上記の特開平5-210132号公報に提案された方法では、LiNbO₃結晶基板において電極間隔が200 μm以下に限定されているため、高電圧の電界印加の際に上記の結晶破壊が生じやすいという問題があり、また、厚い分極反転構造を形成することが難しく、特に、短周期の分極反転構造の形成において、高アスペクト比 (反転幅/反転厚さ) の分極反転構造の形成が困難であるという課題がある。また、上記の特開平9-218431号公報では、その実施形態の中で、オフカット基板内に2 μm~3 μmの厚さの分極反転構造を形成する旨が記載されている。しかし、このときの分極反転周期は4.75 μmと大きく、また、分極反転部の周期方向の幅は2.5 μmであり、波長400 nm~450 nm程度の短波長光の発生に必要な分極反転周期3 μm程度の短周期の周期状の分極反転構造の形成が、難しいという課題がある。

【0013】更に、上記の特開平3-121428号公報及び特開平4-19719号公報には、主にZカット基板における分極反転構造の形成方法が示されているが、これらに提案されている方法では高温雰囲気中で電界印加を行うため、例えば、均一な分極反転構造を形成するためには強誘電体結晶基板内の温度分布を均一に保つ必要があるという課題がある。また、Zカット基板において、分極方向に電極対を配置するため、例えば+C面から成長した分極反転構造の一部が-C面上に配置された電極に達した瞬間に分極反転構造の成長が止まることになって、所望の領域に均一な周期状の分極反転構造を形成することが困難であるという課題がある。

【0014】本発明は、上記課題を解決するためになされたものであって、その目的は、(1) 電界印加により強誘電体中に分極反転構造を形成する方法において、電界印加時の結晶破壊を防止しながら、高アスペクト比を有する厚い分極反転構造の形成を可能にする分極反転構造の形成方法を提供すること、並びに、(2) 上記のような分極反転構造の形成方法を用いて形成した周期状の分極反転構造を有する、波長変換素子の製造方法を提供すること、である。

【0015】

【課題を解決するための手段】本発明の分極反転構造の形成方法は、対向する第1及び第2の主面を有し且つ該第1及び第2の主面にほぼ平行な方向に單一分極化された強誘電体結晶基板の、該第1の主面に第1の電極を形成する、第1電極形成工程と、該強誘電体結晶基板の該第2の主面に第2の電極を形成する、第2電極形成工程と、該第1及び第2の電極に接続された電界印加手段を用いて、該第1及び第2の電極を介して該強誘電体結晶

基板にパルス電界を2回以上にわたって印加して、該強誘電体結晶基板の内部に分極反転構造を形成する分極反転形成工程と、を含んでおり、そのことによって、前述の目的が達成される。

【0016】好ましくは、前記第2の電極の面積が、少なくとも前記第1の電極の面積よりも大きく、該第2の電極の少なくとも一部が、該第1の電極を前記第2の主面へ前記強誘電体結晶基板の厚さ方向に投影したときの投影領域よりも該強誘電体結晶基板の-C軸側に位置している。

【0017】本発明の他の分極反転構造の形成方法は、対向する第1及び第2の主面を有し且つ該第1及び第2の主面にほぼ垂直な方向に單一分極化された強誘電体結晶基板の、+C軸側に位置する該第1の主面に第1の電極を形成する、第1電極形成工程と、該強誘電体結晶基板の-C軸側に位置する該第2の主面に第2の電極を形成する、第2電極形成工程と、該第1及び第2の電極に接続された電界印加手段を用いて、該第1及び第2の電極を介して該強誘電体結晶基板にパルス電界を2回以上にわたって印加して、該強誘電体結晶基板の内部に分極反転構造を形成する、分極反転形成工程と、を含み、該第2の電極の面積が、少なくとも該第1の電極の面積よりも大きく、該第2の電極が、該第2の主面において、該第1の電極を該第2の主面へ該分極方向に投影したときの投影領域を含まないように配置されていて、そのことによって、前述の目的が達成される。

【0018】前記第2電極形成工程が、前記第2の電極と前記強誘電体結晶基板との間に中間絶縁膜を形成する工程を含み、前記分極反転形成工程では、前記第1及び第2の電極と更に該中間絶縁膜を介して、該強誘電体結晶基板に前記パルス電界を印加してもよい。

【0019】ある実施形態では、前記第1の電極が、2つ以上のお互いにほぼ平行な電極列から構成されており、該ほぼ平行な電極列の間の間隔が200μmより大きい。

【0020】ある実施形態では、前記第1の主面の上に、前記第1の電極とほぼ平行に配置されているが該第1の電極から電気的に絶縁されているストライプ状の導電性膜を形成する工程を更に含む。

【0021】前記第1の電極が、2つ以上のお互いにほぼ平行な電極列から構成されており、前記ストライプ状の導電性膜は、その一部が該第1の電極を構成する各電極列の間に位置するように配置されていてもよい。

【0022】例えば、前記第1の電極と前記ストライプ状の導電性膜との間隔が、200μmより大きい。

【0023】ある実施形態では、前記第1の電極を含む前記強誘電体結晶基板の表面を少なくとも覆うように、第1の絶縁膜を形成する工程を更に含み、前記分極反転形成工程では、前記第1及び第2の電極と更に該第1の絶縁膜を介して、該強誘電体結晶基板に前記パルス電界

を印加する。

【0024】前記第1の電極が、少なくとも一部に尖塔部が設けられた形状を有しており、前記分極反転形成工程では、該尖塔部より前記分極反転構造が形成されてもよい。

【0025】ある実施形態では、前記分極反転構造が、周期状形状を有しており、前記第1の電極が、形成される該分極反転構造の該周期状形状に対応する周期状パターンを有する電極である。

10 【0026】例えば、前記周期状パターンを有する電極が樹形電極である。

【0027】好ましくは、前記周期状パターンを有する電極の前記周期状パターンの長手方向の長さLが、40μm≤L≤500μmである。

【0028】好ましくは、前記第1の電極及び前記第2の電極が、その抵抗率が $1.0 \times 10^{-7} \Omega \text{m}$ 以下の材料から形成されている。

20 【0029】好ましくは、前記ストライプ状の導電性膜が、その抵抗率が $1.0 \times 10^{-7} \Omega \text{m}$ 以下の材料から形成されている。

【0030】好ましくは、前記第1の電極及び前記第2の電極の各々の抵抗値が、測定位置に依存せずに200Ω以下である。

【0031】好ましくは、前記ストライプ状の導電性膜の抵抗値が、測定位置に依存せずに200Ω以下である。

【0032】好ましくは、前記分極反転形成工程において、前記パルス電界のパルス幅が20ms以下である。

30 【0033】好ましくは、前記分極反転形成工程において、前記パルス電界の立ち上がり速度が5kV/ms以上である。

【0034】好ましくは、前記分極反転形成工程において、前記パルス電界の繰り返し印加間隔が30ms以上である。

【0035】前記強誘電体結晶基板が、LiNbO₃結晶基板、或いは、MgO、Zn、Scの何れかをドープしたLiNbO₃結晶基板であってもよい。

【0036】或いは、前記強誘電体結晶基板が、液相成長により形成された強誘電体結晶膜を含んでいてよい。

40 【0037】本発明の他の局面によれば、強誘電体結晶基板の中に形成された周期状の分極反転構造を有する波長変換素子の製造方法が提供される。この製造方法では、該分極反転構造を、上記に記載の特徴を有する本発明の分極反転構造の形成方法によって形成する工程を含んでおり、そのことによって、前述の目的が達成される。

【0038】本発明の他の局面によれば、強誘電体結晶基板の中に、周期状の分極反転構造を形成する工程と、該強誘電体結晶基板の中に、該周期状の分極反転構造を

ほぼ垂直に横切る方向に、光導波路を形成する工程と、を少なくとも含む波長変換素子の製造方法が提供される。この製造方法では、該分極反転構造を、上記に記載の特徴を有する本発明の分極反転構造の形成方法によって形成する工程を含んでおり、そのことによって、前述の目的が達成される。

【0039】ある実施形態では、前記分極反転構造は、前記強誘電体結晶基板の上に該分極反転構造に対応するパターンを有するように形成された電極を用いて形成され、前記光導波路は、該電極が形成された領域以外の部分に形成される。

【0040】ある実施形態では、前記光導波路と、前記分極反転構造に対応するパターンを有する電極の電極指の先端との間の距離が、10μm以下である。

【0041】

【発明の実施の形態】（第1の実施形態）單一分極化された強誘電体材料、特に強誘電体結晶基板に、自発分極と対向する電界を印加し、この自発分極を部分的に反転させる分極反転構造の形成方法は、従来より広く行われていた。その方法としては、自発分極（以下、単に「分極」と称する）に対向する電界を形成するために、分極方向の+C側及び-C側にはほぼ平行に配置された正負の電極（電極対）を形成し、これを介して強誘電体結晶基板に電界を印加する。また、分極方向の電界に更に、分極方向と垂直な電界成分を加えることで、形成される分極反転構造の均一化を図った例もある。

【0042】但し、従来は、上記の何れの方法においても、分極を反転させるためには、分極方向に沿って配置された電極対が必要であると考えられてきた。例えば、分極方向が基板正面に対して垂直であるZカット基板の場合には、分極方向に沿うように、基板の対向する2つの正面に一対の正負の電極を形成する。また、分極方向が基板正面に平行であるXカット或いはYカット基板の場合には、分極方向に沿うように、基板の同一正面に一対の正負の電極を形成していた。

【0043】これに対して、本発明の第1の実施形態では、一対の正負の電極を、強誘電体結晶基板の分極方向に対してほぼ垂直な方向に配置形成し、この電極を介して強誘電体結晶基板に電界を印加することにより、分極反転構造を形成する。具体的には、Xカット、Yカット、或いはオフカット基板（Z軸と、X軸或いはY軸の何れかの結晶軸と平行でない面で切り出した基板であり、強誘電体結晶の自発分極の向きに対して角度θ（0° < θ < 90°）をなす面でカットした基板）など、基板正面に対してほぼ平行な分極方向を有する強誘電体結晶基板においては、対向する2つの正面に對をなすように電極をそれぞれ形成し、この電極対の間、すなわち分極方向とほぼ直交する方向に電界を印加することで、分極反転構造を形成する。

【0044】以下、本実施形態について、添付の図面を

参照して説明する。なお、以下の説明では、強誘電体結晶としてMgOドープLiNbO₃結晶（以下、「MgO：LN結晶」と称する）を例にとって、本実施形態を説明する。

【0045】図1（a）は、本発明の第1の実施形態として、オフカットのMgO：LN結晶基板に分極反転構造を形成するための電界印加系の構成を模式的に示す斜視図である。また、図1（b）は、図1（a）を-Y面から見た場合の断面図である。

【0046】図1（a）及び（b）において、1は單一分極化されたオフカットのMgO：LN結晶基板、2はMgO：LN結晶基板1の第1の正面に形成された樹形電極、3はMgO：LN結晶基板1の第2の正面に形成された電極、4は電極2を含むMgO：LN結晶基板1の第1の正面を覆うように形成された絶縁膜、5は電源、6は形成される周期状の分極反転構造である。樹形電極2は、形成される分極反転構造6の周期に対応する周期状パターンを持つ。電極3の面積は、少なくとも樹形電極2の面積よりも大きい。また、電極3は、樹形電極2を第2の正面に投影した領域（投影領域）に重なるように配置されており、少なくともその一部は、この投影領域よりも、MgO：LN結晶基板1の-C軸側になるような位置に配置されている。但し、電極3の少なくとも一部が、樹形電極2の第2の正面への投影領域よりもMgO：LN結晶基板1の-C軸側に位置していれば、電極3が上記投影領域に重なっている必要はない。

【0047】なお、電源5は、印加電圧、印加時間、及び立ち上がり速度を制御することが可能な、パルス電界発生源である。

【0048】本実施形態においては、MgO：LN結晶基板1として、厚さ約500μmの3°カット基板（結晶基板表面に対して分極軸方向が3°傾くように切り出されたオフカット基板）を用い、樹形電極2の電極指は、長さ40～100μm、幅1μm、周期3μmで形成する。樹形電極2及び電極3を形成する材料としては、Ta（タンタル）、Al（アルミニウム）、Cu（銅）、Au（金）、Ag（銀）等をはじめとする導電性材料の利用が可能であるが、特に抵抗率が1.0×10⁻⁷Ωm以下の材料を用いると、電界印加時の電極直下の電界強度分布を均一にすることができるため、形成される分極反転構造6の均一性を高めることができる。また、特に、樹形電極2及び電極3の抵抗値が、その測定位置に依存せずに、電極の何れの部分においても200Ωを超えないようにすることにより、上記の均一性を更に向上することができる。すなわち、樹形電極2及び電極3の抵抗値は、その測定位置に依存して異なる値を示すことがあり、例えば、樹形電極2ではその電極指（周期状パターンの部分）で測定すると最も高い測定値を示すが、そのような部分での測定値であっても上記のように200Ωを超えないようにすることにより、形成され

11

る分極反転構造6の均一性を向上することができる。

【0049】或いは、樹形電極2及び電極3の低抵抗化は、構成材料として低抵抗材料を使用する他に、樹形電極2及び電極3の厚さを増すことによっても達成することができる。なお、電極厚さによる低抵抗化は、特に、上記の電極指の様な数 μ mオーダの微細なパターン部分において、大きな効果が得られた。

【0050】以下、本実施形態においてTa電極を用いた場合について、説明する。

【0051】このとき、樹形電極2及び電極3が厚さ数100Å～2000Åになるように形成し、また、絶縁膜4は、例えばSiO₂やNb₂O₅などを用いて、樹形電極2及びMgO:LN結晶基板1の第1の主面を完全に覆うように被着形成する。絶縁膜4の厚さは、樹形電極2及び電極3の厚さよりも十分大きくなるように、数100Å～3000Åとする。樹形電極2及び電極3の形成は、蒸着やスパッタリング等によりMgO:LN結晶基板1の表面にTa薄膜を成膜し、フォトリソグラフィープロセス及びエッチングプロセス、或いはリフトオフ等を用いることにより、容易に行うことができる。絶縁膜4の被着形成も、スパッタリング等を用いることにより、容易に実現できる。このようにして形成された樹形電極2及び電極3を介して、電源5を用いてMgO:LN結晶基板1に電界印加を行うことにより、分極反転構造6が形成される。

【0052】次に、図2を参照して、本発明による分極反転構造の形成方法の原理について、説明する。

【0053】図2は、強誘電体結晶基板の分極方向と垂直な方向に配置された電極を用いて電界印加を行う際に形成される電界の様子を示す模式図であり、7はXカットのMgO:LN結晶基板であり、8及び9は、MgO:LN結晶基板7の対向する2つの主面にそれぞれ形成された電極である。また、10は電源であって、11は、電源10により電極8及び電極9を介してMgO:LN結晶基板7に電界が印加された時に、MgO:LN結晶基板7の中に形成される電界である。更に、12は、MgO:LN結晶基板7の分極方向である。

【0054】図2に示す構成を用いてXカットMgO:LN結晶基板7に電界印加を行ったところ、分極方向12と垂直な方向に配置された電極8及び9を用いているにもかかわらず、電極8のエッジ直下の領域には分極反転部（図2には不図示）が形成された。

【0055】本願発明者は、更なる検討を通じて、電界印加時には、電極8及び電極9のエッジ部分に電界が集中し、かつ、その集中箇所における電界成分として、MgO:LN結晶基板7の主面（すなわちXカット及びYカット基板における分極方向12）に平行な電界成分が存在すること、及び、この電界成分により、分極反転構造が形成されるということを見いだした。そこで、上記の電界成分を用いて、所望の分極反転構造を形成するこ

12

とを試みた。また、電極8の面積に対して電極9の面積を大きくし、且つ、電極9を、その少なくとも一部が、電極8を対向する主面に投影した領域（投影領域）よりも-C軸側に存在するように配置することにより、電極8のエッジ近傍において電界印加時の分極方向電界成分を大きくすることができ、結果として、形成される分極反転構造の分極方向に沿った長さを大きくすることができます。また、特に、オフカット基板を用いる場合においては、基板の分極方向が基板主面に対して傾いているため、本実施形態に示した分極反転構造の形成方法において、分極方向の電界成分と分極方向に垂直な電界成分との相乗効果により、基板厚さ方向に対して厚い分極反転構造を形成することが可能である。

【0056】次に、従来の電界印加による分極反転構造の形成方法に対して、本発明の分極反転構造の形成方法を用いた場合の効果及び利点について述べる。

【0057】本発明が解決した従来の分極反転構造の形成方法における問題点としては、（1）電界印加時に生じる結晶破壊の低減、及び（2）電界印加時に電極対の間で生じる放電の防止がある。更に、本発明の構成上の利点としては、（1）分極反転構造の集積度の向上、及び（2）分極反転構造の形成のスループットの向上がある。以下では、それについて詳しく説明する。

【0058】まず、電界印加による分極反転構造の形成におけるMgO:LN結晶基板の破壊について、以下に説明する。

【0059】接触電極による電界印加法によりMgO:LN結晶基板の中に周期状の分極反転構造を形成するには、一般に、分極方向、或いは分極方向とほぼ平行な方向になるように、MgO:LN結晶基板の主面上に正負の電極（電極対）を形成配置する。この際、Xカット基板、Yカット基板、及びオフカット基板においては、同一主面内に、正負の電極が数100 μ mの間隔で形成されることになる。このように形成された電極対を用いてMgO:LN結晶基板に電界を印加すると、結晶基板の持つ圧電性により、結晶基板に歪みを生じる。このときの歪みの大きさは、電界強度の大きさに比例する。従来から行われてきた電界印加による分極反転構造の形成方法では、数kV/mm～数10kV/mmという大きな電圧を印加するため、この変形量が大きくなり、MgO:LN結晶基板が破壊されるという問題がある。特に、電極直下及びその近傍においては、電界強度が大きいために結晶基板の破壊が著しい。このため、例えば、従来の分極反転構造の形成方法により周期状の分極反転構造を形成した後に、周期状の分極反転構造と直交するように光導波路を形成して光導波路型波長変換素子を作製すると、結晶が破壊されている部分で、散乱による導波ロスが大きくなる。

50 【0060】そこで、本願発明者は、先に図1（a）及

び（b）に示したように、MgO：LN結晶基板の対向する2つの主面にそれぞれ電極を形成し、これらの電極間に電界を印加することで、結晶破壊を防止することを試みた。

【0061】前述したように、強誘電体に高電圧を印加すると、結晶基板の持つ圧電性により、結晶基板に電界強度の大きさに比例した歪みを生じる。例えば、オフカット基板における電界印加法では、従来はMgO：LN結晶基板の第1の主面上に、対をなす正負の電極を配置していた。このとき、電界はMgO：LN結晶基板の主面に沿うように形成され、従って、上記の結晶基板の歪みは、電極を配置した第1の主面及びその近傍において非常に大きく（特に電界強度が大きくなる電極直下の歪みがもっとも大きい）、MgO：LN結晶基板の厚さ方向に対しては、急激に小さくなる。このように結晶の歪みが局所的に存在することが、結晶破壊の原因になっている。そこで本発明においては、図1（a）及び（b）に示すように、MgO：LN結晶基板1の対向する主面に樹形電極2及び電極3をそれぞれ形成し、これらの電極2及び3の間に電界を印加したところ、高電圧の電界印加による結晶破壊を緩和することができた。これは、MgO：LN結晶基板1の対向する主面に配置された樹形電極2と電極3との間に電界を形成することにより、局所的な結晶の歪みを防止することができるためと考えられる。同一主面内に電極対を配置した場合には、各電極のエッジ部分（例えば樹形電極を形成した場合には電極指先端）に電界が集中するのに対して、本実施形態のように、MgO：LN結晶基板1の対向する2つの主面に樹形電極2及び電極3をそれぞれ配置した場合には、結晶の歪みは、MgO：LN結晶基板1の厚さ方向に対して、電極を形成した領域全体に渡ってほぼ均一に生じて、上記の電界集中を緩和することができる。これにより、電界印加の際に生じるMgO：LN結晶基板1の破壊を防止することができ、高電圧の電界を印加することで、結晶破壊を防止しながら厚い分極反転構造6を形成することが可能になる。

【0062】更に、本実施形態で示した分極反転構造の形成方法は、高電圧パルス電界を複数回に渡って印加する方法（以下、「多重パルス電界印加」或いは「多重パルス電界印加法」と称する）に対して、特に有効であり、多重パルス電界印加を行うことにより、更に厚い分極反転構造を形成することができる。

【0063】第2の実施形態において更に詳しく述べるように、單一分極化されたMgO：LN結晶基板において多重パルス電界印加を行うことにより、形成される分極反転部の周期方向での広がりを抑えながら、その厚さを増大することができる。一般に、多重パルス電界印加では、MgO：LN結晶基板の結晶破壊が生じ易く、従来のようにMgO：LN結晶基板の同一主面内に対をなす正負の電極を形成すると、電極近傍の結晶表面

が著しく破壊されていたが、本実施形態の手法を取ることにより、上記の結晶破壊をなくすことができる。

【0064】また、上記のように、オフカットのMgO：LN結晶基板1の対向する主面にそれぞれ形成した樹形電極2及び電極3による電界印加で分極反転構造6を形成する方法においては、MgO：LN結晶基板1の分極方向に電界が形成されることが重要であるが、第2の主面に形成する電極3の面積を第1の主面に形成する樹形電極2よりも大きくし、かつ、電極3の少なくとも一部を、樹形電極2を第2の主面へ基板の厚さ方向に投影したときの投影領域よりも-C軸側に配置することにより、形成される電界ベクトルの分極方向成分を大きくすることができる。なお、このときに、電極3が上記の投影領域に重なるように配置されてもよく、或いは重なっていなくても良い。この際、電極3が樹形電極2に対して完全に分極方向にずれて位置するような配置を取る必要はないので、例えば、MgO：LN結晶基板1のエッジ付近においても、厚い分極反転構造の形成が可能であるという利点を有する。

【0065】また、形成される分極反転構造6の厚さは、樹形電極2の電極指の直下の分極反転発生領域の大きさに対応している。本実施形態で用いた3°カット基板にて厚さ2.0μm以上の分極反転構造を得るために、電極指の直下に約40μm以上の分極反転領域が形成される必要があるため、電極指の長さ（すなわち、樹形電極2の周期状パターンの長手方向の長さ）を40μm以上とすることが好ましい。樹形電極2の電極指の長さを40μm～1000μmの範囲で変化させて検討を行ったところ、電極指長さが長くなるにつれて電極指部分の抵抗値が大きくなり、電極指長さが500μmよりも大きくなると、分極反転領域が電極指に沿って小さくなり、また、形成される分極反転構造6が不均一になるという問題が生じた。従って、樹形電極2の電極指長さ（樹形電極2の周期状パターンの長手方向の長さ）は、40μm～500μmであることが望ましい。

【0066】上記のような本実施形態の分極反転構造の形成方法により、具体的には、3°カット基板において、周期3μm、厚さ2.2μm以上、分極反転幅1.5μmの周期状の分極反転構造を形成することができた。このようにして、分極反転部と非反転部との割合がほぼ1:1であり、周期3μm、厚さ2μm以上である周期状の分極反転構造を実現できたことにより、例えば、導波路型波長変換素子において、最も効率のよい疑似位相整合状態を形成し、かつ、導波路断面に対して分極反転部分との重なりを大きくすることができ、より高効率の波長変換素子を作製することができた。

【0067】次に、電界印加時に電極間で生じる絶縁破壊について、説明する。

【0068】Xカット、Yカット、及びオフカット基板に対する従来の分極反転構造の形成方法においては、真

空気圧気中或いは絶縁液内で電界印加を行っているが、結晶表面の不純物等によって、高電圧電界印加により電極間で絶縁破壊が生じることがある。また、電極バターンに不均一部分があると電極間で放電が生じ、これも絶縁破壊の原因になる。これに対して、本発明の分極反転構造の形成方法においては、結晶基板の2つの対向する主面に電極対を形成するため、高い絶縁性を有する強誘電体基板を介して電極が存在する形になり、結晶表面の不純物等に起因する放電を防止することができる。これにより、電界印加時に生じる絶縁破壊を大幅に低減することができ、分極反転構造の形成の歩留まりを一桁以上向上することができる。

【0069】また、本実施形態に示したように、MgO : LN結晶基板の対向する主面に電極対を配置することによる別の効果として、形成される周期状の分極反転領域の集積度を向上することができるという利点がある。これは、MgO : LN結晶基板の同一主面に正負の電極を配置する必要が無いことにより、可能になった特徴である。

【0070】従来の分極反転構造の形成方法と本発明の分極反転構造の形成方法における分極反転構造の形成領域の集積度の違いを、図3(a)及び(b)を参照して説明する。

【0071】図3(a)は、従来の分極反転構造の形成方法の場合における電界印加系の構成例を模式的に示し、図3(b)は、本発明の分極反転構造の形成方法の場合における電界印加系の構成例を模式的に示す。図3(a)及び(b)において、13はオフカットのMgO : LN結晶基板、14及び16は周期状パターンを有する櫛形電極、15及び17は電極、18は電源である。

【0072】図3(a)の従来技術における構成では、櫛形電極14及び電極15は、MgO : LN結晶基板13の同一主面上に形成配置される。一方、本発明による図3(b)の構成では、櫛形電極16及び電極17は、MgO : LN結晶基板13の対向する主面に、それぞれ形成配置されている。櫛形電極14及び櫛形電極16は、それぞれ電極15及び電極17に対して、+C軸側に配置されている。図中のL1、L2、及びL3はそれぞれ、隣接する電極間の間隔を示す。また、図3(a)及び(b)の双方において、形成される分極反転構造の形成領域の集積化のために、櫛形電極14及び櫛形電極16に、複数の電極からなる電極列を構成している。また、電極15は、櫛形電極14の各電極と1対1の対応関係を持つように配置されている。

【0073】このような構成において、電源18を用いて電界印加を行うと、形成される分極反転構造は、櫛形電極14及び櫛形電極16の各電極の先端部の直下に発生し、-C軸方向に向かって成長する。前述のように、図3(a)の場合には、電界印加における絶縁破壊

を防止するために、電極の間隔L1及びL2を200μm以上とする必要があり、更に望ましくは、絶縁破壊を大幅に低減するために、間隔L1及びL2を400μm以上とする必要がある。従って、上記の間隔に依存して、周期状の分極反転構造の形成領域の密度（単位面積あたりの周期状の分極反転構造の数）が制限される。これに対して、図3(b)の場合には、構造的に同一主面内での絶縁破壊は生じないため、櫛形電極16の電極列の間隔L3を200μm以下に設定することが可能である。本実施形態においては、この間隔L3を50μm～400μmの間で様々に変化させて形成プロセスを実施したが、上記の範囲内で均一な周期状の分極反転構造の形成が確認された。

【0074】以上のように、本実施形態においては、周期状の分極反転構造の集積度を向上することができる。これにより、本実施形態では、例えば、ウェハ状のMgO : LN結晶基板から光導波路型波長変換素子を作製する場合に、同一結晶基板から作製可能な素子の数を、従来の4倍以上にことができる。

【0075】また、従来の分極反転構造の形成方法においては、例えば電極バーニングの不良による正負電極の接触があった場合には電界印加が不可能となる恐れがあるため、ウェハ内で電極形成領域を分割し、各分割領域に対して電界印加を行う必要があるが、本発明の分極反転構造の形成方法においては、MgO : LN結晶基板の対向する主面に正負の電極をそれぞれ形成するため、構造的に電極バーニングの不良による正負の電極の接触がない。このため、例えばウェハ全面に一度に電界印加を行って、分極反転構造を形成することが可能である。これにより、本発明によれば、1プロセスで大面積に渡って分極反転構造の形成を行って、分極反転構造の形成のスループットを大幅に向上することができる。

【0076】なお、本実施形態においては、MgO : LN結晶基板のオフカット基板における分極反転構造の形成方法を例に取って説明してきたが、MgO : LN結晶基板のXカット基板、或いはYカット基板においても、同様の効果が得られる。更に、強誘電体結晶として、LiNbO₃結晶（以下、「LN結晶」と称する）、LiTaO₃結晶（以下、「LT結晶」と称する）、或いは、ZnやIn、Sc等をドープしたLN結晶やLT結晶等を用いた場合においても、本発明の分極反転構造の形成方法による分極反転構造の形成が可能である。また、上記の各結晶のXカット基板、Yカット基板、及びオフカット基板を用いた場合においても、本発明に従って結晶基板の対向する2つの主面に電極対を形成することにより、多重パルス電界印加による結晶破壊及び絶縁破壊を防止しながら、周期状の厚い分極反転構造を形成することができる。これにより、形成される分極反転部の厚さを、従来の値に比べて約1.5倍に増大することができる。

【0077】また、本実施形態においては、樹形電極を用いて周期状の分極反転構造を形成する場合について述べたが、例えばMgO:LN結晶の+C軸側に配置する電極として、電極の少なくとも一部を尖塔形状（例えば、他の部分よりも数μmだけ-C軸側に突出した凸型の形状）にしたものを用いることにより、その尖塔部の先端直下より分極反転構造を形成することができ、MgO:LN結晶基板の任意の場所に分極反転構造の形成を行うことができる。これは、電界印加の際に電極の尖塔部に電界が集中することにより、尖塔部の先端近傍の電界強度が大きくなることに起因している。

【0078】（第2の実施形態）本実施形態においては、MgO:LN結晶基板の同一主面上に形成された電極対を介して電界印加を行って分極反転構造を形成する方法において、印加パルス電界波形の制御、及びパルス電界の複数回繰り返し印加（多重パルス電界印加）を行う。これにより、MgO:LN結晶基板の厚さ方向に対して厚い周期状の分極反転構造の形成が可能になる。これらの特徴について、以下に詳しく説明する。

【0079】MgO:LN結晶は、LiNbO₃結晶にMgOを数mo 1%ドープすることにより形成される。一般に、ドープ量が多いほど、結晶中の電子移動度が大きくなり、これにより抗電界が低くなる傾向にある。従って、分極反転構造に必要な電圧（以下、「反転電圧」と呼ぶ）が低くなっている。低電圧での分極反転構造の形成が可能である。また、MgO:LN結晶の光学的性質として非線形定数が大きく、更に、5mo 1%程度以上のMgOドープ量においては耐光損傷強度が大きいという特徴がある。なお、MgO:LN結晶の結晶引き上げに関しては、その方法が確立されており、單一分極化されたMgO:LN結晶が形成可能である。

【0080】接触電極による電界印加法によりMgO:LN結晶中に周期状の分極反転構造を形成するには、一般に、MgO:LN結晶表面の分極方向とほぼ平行な方向に電極対を形成する。すなわち、Zカット基板においては、対向する2つの主面に電極対が形成され、一方、Xカット基板、Yカット基板、及びオフカット基板においては、同一主面内に電極対が形成されることになる。この時、少なくとも結晶の+C軸側に配置されている電極を、所望の周期状の分極反転構造に対応するパターンにする必要がある。これは、形成される分極反転構造が、+C軸側から発生して成長するためである。このように形成された電極対の間に、MgO:LN結晶の自発分極の負側（-C軸側）にある電極の電位が低くなるように数kV/mm～数10kV/mmの電圧を印加することによって、自発分極の反転を生じさせることができる。

【0081】しかし、従来の電界印加による分極反転構造の形成方法においては、（a）形成される周期状の分極反転構造の各分極反転部の幅が、周期状パターン電

10 棒の各電極指の幅よりも太く形成される（例えば、1μmの電極指の幅に対して、形成される分極反転構造の幅が2μm以上になる）、（b）同じ電界印加工程によって同時に形成される各分極反転部の幅及び形状に、ばらつきが生じる、並びに、（c）短周期の分極反転構造形成において、基板の厚さ方向の分極反転部の厚さの増大が困難である、といった問題があった。特に、3～4μm程度という短周期の周期状の分極反転構造を形成する場合には、分極反転部の周期方向への広がりを抑えながら、より厚い分極反転構造を形成することが、困難であった。

【0082】そこで本願発明者は、従来の電界印加法におけるXカットのMgO:LN結晶基板への周期状の分極反転構造の形成プロセスについて、上記の課題の原因を調査した。

【0083】この場合の電界印加は、図4に示す構成を行った。図4において、19は單一分極化されたXカットのMgO:LN結晶基板、20は、MgO:LN結晶基板19において同一主面内の分極方向に配置されている電極対、21は、電極対20を含むMgO:LN結晶表面を覆うように形成された絶縁膜、22は電源、23は形成される分極反転構造である。また、24は、MgO:LN結晶基板19の分極方向である。

【0084】このとき、電極対20は、周期状パターンを持つ樹形電極20aとストライプ電極20bとからなり、樹形電極20aがMgO:LN結晶基板19の+C軸側に配置されており、電極指の周期は、形成される分極反転構造23の周期と対応している。また、このときの印加する電圧は、約10～15kV/mmであり、パルス幅を2ms～10sとした。印加する電圧波形は、ほぼ矩形のパルス電圧であった。

【0085】上記の方法で分極反転構造の形成を行った結果、形成される分極反転構造の形状が、印加電界波形（印加電圧の大きさ、印加パルス幅、パルス電界の立ち上がり速度）、及び、電極構造（材料、電極厚さ、樹形電極の電極指長さ）に依存することを見出した。そこで、それぞれの条件が、形成される分極反転構造23の形状に与える影響について、更に検討を行った。

【0086】まず、本願発明者は、印加パルス波形に関する検討より、印加パルス電界のパルス幅と、形成される分極反転部のアスペクト比（分極反転構造23の周期方向の広がりWと分極反転構造23の厚さdとの比d/W）との間に、相関があることを見出した。例えば、同一電圧のパルス電界の印加においては、そのパルス幅が小さい場合、すなわち印加時間が短い場合には、形成される分極反転構造23の分極方向長さは短くなり、基板の厚さ方向及び分極反転構造23の周期方向への広がりも小さくなるが、その一方で、パルス幅が小さい場合には、形成される分極反転構造23のアスペクト比は高くなり、また、分極反転構造23の均一性が高くなる。

【0087】ここで、形成された分極反転構造23のアスペクト比(d/W)及び基板厚さ方向への分極反転構造23の厚さ d と、印加パルス電界のパルス幅との関係を、図5に示す。図5において、横軸は印加パルス電界のパルス幅、縦軸は形成される分極反転構造23のアスペクト比(d/W)及び分極反転構造23の厚さ d を、それぞれ示している。

【0088】図5から分かるように、形成された分極反転構造23のアスペクト比(d/W)は、印加パルス電界のパルス幅に対応しており、パルス幅を制御することにより、分極反転構造23の形状を制御することが可能である。特に、20ms以下のパルス幅においてアスペクト比が著しく大きくなり、更に、5ms以下のパルス幅に対しては、高アスペクト比の分極反転構造23が得られる。

【0089】また、分極反転構造23の厚さ d は、パルス幅を短くするに伴って減少する傾向にある。その原因としては、以下のように考えることができる。一般に、高温下においては、分極反転構造の形成に必要な電圧（以下、「反転電圧」と称する）が低くなり、分極反転構造23が生じ易くなることが分かっている。今回の検討のように、電界印加によってMgO:LN結晶基板19の内部に分極反転構造23が形成される際には、電極直下のMgO:LN結晶基板19、及びMgO:LN結晶基板19の内部であって分極反転構造23が形成された近傍に熱が発生する。その場合には、低い電圧が印加されている箇所（すなわち電界強度の低い部分）であっても、分極反転構造が生じやすくなる。これが、分極反転構造23の周期方向の広がりの原因になると考えられる。また、同様の原因により、例えば櫛形電極20aのバーニングに不均一部分があつたり、電極対20を形成する際に電極厚さが不均一であつたりした場合には、分極反転構造の形状が不均一になる。ここで、上記で発生する熱量は、印加電圧と印加の際に流れる電流と印加時間との積に比例し、パルス電界のパルス幅が大きいほど、発生する熱量は大きくなり、分極反転構造23の広がりも大きくなる。すなわち、分極反転構造の形成の際にMgO:LN結晶基板内に流れる電流（反転電流） I_1 とMgO:LN結晶の電気抵抗 R_1 により生じる熱量 Q_1 （ $= R_1 \times I_1^2$ ）という要因により、電界印加の際にMgO:LN結晶基板19の内部の分極反転構造の形成領域の近傍の温度が局所的に上昇し、分極反転構造の形状の制御や形成される分極反転構造23のアスペクト比の制御が困難になると考えられる。

【0090】また、本願発明者の検討により、印加パルス電界の立ち上がり速度が、分極反転構造の形成に寄与していることも明らかになった。今回の検討において、印加電界の大きさを4~7kV、印加パルス幅20msとして、パルス電界の立ち上がり速度による分極反転特性の比較を行ったところ、立ち上がり速度が遅い場合に

は、形成される分極反転構造23が小さく、また不均一になるということがわかった。特に、5kV/ms未満の立ち上がり速度にした場合に、この傾向が強く、逆に5kV/ms以上の立ち上がり速度においては、分極反転領域の大きさ、及び分極反転構造の形状がほとんど変わらず、均一性も高いという結果が得られた。

【0091】次に、電極構造と形成される分極反転構造の形状との関係について述べる。

【0092】前述したように、分極反転構造の形成時に発生する熱は、分極反転構造の形状に大きな影響を与える。ここで、電界印加の際には、反転電流として基板内部を流れる電流と同時に、電極の中を流れる電流が存在する。従って、電極の中を流れるこの電流 I_2 と電極の電気抵抗 R_2 に起因する熱量 Q_2 （ $= R_2 \times I_2^2$ ）が発生することになる。特に、分極反転構造23が発生する部分の電極（例えば櫛形電極20aの電極指の先端部など）の抵抗値は、分極反転構造23の形状に与える影響が大きい。

【0093】幾つかの材料を用いて実験を行ったところ、このような熱的影響を低減するためには、電極対20の構成材料として、その抵抗率が $1.0 \times 10^{-7} \Omega \text{m}$ 以下のものを用いる必要があるということが分かった。これより大きな抵抗率を有する電極構成材料を用いた場合には、分極反転構造23のアスペクト比の制御が難しく、反転周期4μm以下の周期状の分極反転構造が形成できないことが分かった。具体的には、電極対20を形成する材料としては、例えばTa（タンタル）、Al（アルミニウム）、Cu（銅）、Au（金）、Ag（銀）等をはじめとする導電性材料の利用が可能である。

【0094】また、低抵抗の電極材料の使用は、電界印加時の電極直下の電界強度分布を均一になるため、形成される分極反転構造23の均一性を高めるためにも、有効である。

【0095】なお、電極の抵抗を小さくする方法としては、先述のように、電極の厚さを増大させることも有効な手段である。例えば、Taを用いた場合においては、電極厚さを1000Å以上とすることにより、上記の熱的影響を低減して高アスペクト比の分極反転構造23を得ることができ、また、分極反転構造23の均一性を向上することができた。

【0096】以上のような検討結果をふまえて、本発明において、印加パルス電界を短パルス化する（すなわち、印加時間を短くする）ことにより、電界印加時の発生熱量を低減し、また、低抵抗の電極材料を選択することにより、分極反転構造の形成に寄与する熱的影響を除去することを試みた。その結果、上記の検討結果に基づいて、パルス幅20ms以下の短パルス電界を印加し、また、低抵抗を導電材料であるTa、Cu、Al等を電極材料に選ぶことにより、高アスペクト比の分極反転構造23を得ることができた。

【0096】しかし、単一パルス電界の印加においては、形成される分極反転部の厚さは約1.2μm程度であり、例えば光導波路型波長変換素子を作製した場合に、十分な変換効率を得ることができない。そこで、20ms以下のパルス電界を複数回印加（多重パルス電界印加）することにより、形成される分極反転構造23の周期方向の広がりを抑え且つ均一性を保ったままで、分極反転構造23の厚さの増大を図ることを試みた。印加パルス幅を10msとして多重パルス電界印加を行った場合の分極反転部の厚さの比較を行ったところ、図6に示すように、印加回数の増加とともに分極反転部の厚さが増大していることが分かった。このとき、形成された分極反転構造23のアスペクト比は、印加回数によらず、ほぼ一定であった。すなわち、本発明に従った多重パルス電界印加によって、高アスペクト比で且つ厚い分極反転構造23を形成することができた。

【0097】更に、例えば10msのパルス電界で10回の多重パルス印加を行った場合と、100msのパルス電界で1回の電界印加を行った場合とを比較すると、形成される分極反転構造23の形状に大きな差が見られた。具体的には、100msのパルス電界を用いた場合には、形成された分極反転構造23の周期方向広がりが大きく、隣接する分極反転部が接触している部分が多く見られたが、多重パルス印加を行った場合は、均一性が高く、分極反転構造23の周期方向への広がりはわずかであった。同様の検討をパルス電界のパルス幅を変えて行ったところ、20ms以下のパルス電界で、アスペクト比及び均一性の向上が著しく、特に5ms以下のパルス電界においては、形成された分極反転構造23の周期方向への広がりはほとんどなかった。

【0098】また、短パルスの多重パルス印加においては、パルス間隔が分極反転構造の形状に与える影響も大きかった。短パルス化することによって、電界印加時に発生する熱量は小さくなっているが、実際には、わずかな熱量が依然として発生する。このため、パルス印加間隔が短い場合には、発生した熱が拡散されるより先に新たに熱が発生し、これが徐々に蓄積されることになる。この結果、パルス電界印加数が多い場合には、徐々に熱的影響が出てくることになる。そこで、これを回避するために、多重パルス電界印加のインターバル（印加間隔）を十分大きく取る（例えば数秒間隔で印加する）ことにより、発生した熱の影響を完全に除去することができた。具体的には、パルス間隔を30ms以上とすることが望ましく、更に、パルス間隔を1秒以上にした場合には、上記のような徐々に蓄積される熱的影響は全く見られなかった。

【0099】本発明の第2の実施形態における、MgO:LN結晶のXカット基板に分極反転構造を形成するための装置構成は、先に図4として示した通りである。本実施形態においては、強誘電体結晶19の分極方向2

4に電極対20を形成して、電界印加を行う。

【0100】本実施形態では、電極対20を形成する材料としてTaを用いた場合について説明する。このときの電極対20の厚さを数100Å～2000Åとして、楕形電極20aとストライプ電極20bとの電極間隔は100μm～2000μmとした。

【0101】分極反転構造23の厚さを増大させるためには、高電圧の電界を印加することが有効な手段の一つである。しかし、例えば特開平5-213132号公報

10で提案された分極反転構造の形成方法における電極間隔（190μm以下の場合）では、電界印加の際に電極間で放電が生じ、結晶の絶縁破壊が生じ易くなるという問題があった。また、特にXカット及びYカット基板においては、分極反転構造23が成長する際に、楕形電極20a直下から発生して成長した分極反転構造23が対向するストライプ電極20bに達した瞬間に、電極対20が導通した状態になるために分極反転構造23の分極方向への成長が止まり、これが、周期方向への不均一な広がりが増大する原因になっていた。

20 【0102】これに対して、本実施形態においては、電極間隔を大きく設定することにより、これらの問題を回避することができる。但し、電極間隔が1000μmを超えると、分極反転構造23が形成されにくく、また不均一になった。従って、電極間隔としては200μm～1000μmとすることが望ましく、特に300μm～500μmの場合に、均一で高アスペクト比の厚い分極反転構造が形成できた。

【0103】絶縁膜21は、例えばSiO₂やNb₂O₅などの誘電体材料を用いて、電極対20及びMgO:LN結晶基板19の表面を完全に覆うように被着形成する。絶縁膜21の厚さは、電極の厚さよりも十分大きくなるように、数100Å～3000Åとする。

【0104】以上のように、周期状のパターンを持つ楕形電極20aを絶縁膜21で覆い、特に電極指間のMgO:LN結晶基板19の表面を絶縁膜21で埋めることにより、電極指間のセバレーションを高め、不均一性の原因となる隣り合う電極指からの電界の影響を減じることができ。これは、絶縁膜21として誘電率の高い絶縁材料を用いることによって、電極指からの漏れ電界の電極指間領域への浸入を減じることができるためであり、電極指以外の領域の電界強度は、大きく減少することになる。なお、電源22は、印加電圧、立ち上がり時間及び印加時間を制御することが可能なパルス電界発生源である。

【0105】以上のような構成を利用して実施される本実施形態の分極反転構造の形成方法について、以下で、その動作を述べる。

【0106】電極対20は、蒸着やスパッタリング等により、MgO:LN結晶基板19の表面に導電材料からなる薄膜を製膜し、フォトリソグラフィープロセス及び

エッティングプロセス、或いはリフトオフ等を用いることにより、容易に形成できる。絶縁膜21の被着形成も、スパッタリングを用いることにより容易に実現できる。このようにして、電極対20及び絶縁膜21を形成したMgO:LN結晶基板19に対して電界印加を行うことにより、均一で厚い周期状の分極反転構造23を形成することができる。電界印加は、不活性絶縁液の中で、MgO:LN結晶基板19の上に被着形成された絶縁膜21を介して電極対20に外部電極を接触させ、この電極対20を介して、電源22からのパルス電界をMgO:LN結晶基板19に印加することによって実施する。このとき、MgO:LN結晶基板19の+C軸側に配置された樹形電極20aの電位が、-C軸側に配置されたストライプ電極20bの電位よりも高くなるようにして、印加電圧が数kV/mm～数10kV/mm、印加時間が20ms以下のパルス電界を複数回印加することにより、電界印加を行う。

【0107】例えば、電圧10kV/mm、パルス幅5msのパルス電界を用いることにより、約1.2μmの電極指の幅に対して、形成される分極反転構造23の幅を約1.5μm以下にすることができた。また、このときの分極反転構造23の厚さは約1.5μmであった。

【0108】これにより、例えば3μm周期の周期状の分極反転構造において、分極のデューティー比（非反転領域幅と反転領域幅との比）が1:1となる周期状の分極反転構造を形成することができ、波長変換素子を構成する場合の位相整合を完全に満たす均一な周期状の分極反転構造が達成できた。

【0109】上記のような多重パルス電界印加において形成される分極反転部の厚さを更に増大する方法として、2次元電界印加法による分極反転構造の形成を試みた。図7に、本発明の第2の実施形態における、2次元電界印加法を用いてMgO:LN結晶基板内に分極反転構造を形成するための装置構成例を示す。

【0110】図7において、25は單一分極化されたXカットのMgO:LN結晶基板、26は、MgO:LN結晶基板25において第1の主面内の分極方向に配置されている電極対、27は、電極対26を含むMgO:LN結晶表面を覆うように形成された絶縁膜、28は第2の主面に形成されている電極、29は電源である。また、30は形成される分極反転構造である。このとき、電極対26は、周期状パターンを持つ樹形電極26aとストライプ電極26bとからなり、樹形電極26aがMgO:LN結晶基板26の+C軸側に配置されており、電極指の周期は、形成される分極反転構造30の周期と対応している。また、ストライプ電極26bと電極28とを導通することにより、電界印加の際には、MgO:LN結晶基板26の面内方向と厚さ方向とに同時に電界が印加されることになる。このような電界印加法を、2次元電界印加法と呼ぶ。

【0111】なお、本実施形態では、電極対26及び電極28の構成材料をTaとし、これらの各電極26及び28の厚さを1000Åとした。また、絶縁膜27の材料はSiO₂であり、その厚さを2000Åとした。

【0112】以上のような構成において、上述した多重パルス電界印加を行うことにより、MgO:LN結晶基板25の内部に生じる電界分布をコントロールすることが可能になる。これより、MgO:LN結晶基板25のより深い部分において、電界強度を強めることができて、結果として、形成される分極反転構造30の厚さを増すことができる。このとき、前述したように多重パルス電界印加を行うことにより、形成される分極反転構造30の周期方向への広がりを抑えることができる。これにより、電圧10kV/mm、パルス幅5msのパルス電界を用いて、約1.2μmの電極指の幅に対して、形成される分極反転構造30の幅を約1.5μm以下にすることことができた。またこのときの分極反転構造30の厚さは、約1.7μmであった。

【0113】以上のように、本発明の第2の実施形態においては、第1の実施形態とは異なって、強誘電体結晶の分極方向に沿って配置された電極対を形成し、この電極対を介して強誘電体に電界を印加することにより、分極反転構造を形成する。

【0114】或いは、第1の実施形態で説明したように、強誘電体結晶の分極方向にはほぼ垂直な方向に沿って配置された電極配置に対して、本実施形態で述べたように、印加電界として短パルス電界を用いて多重パルス電界印加を行って、高アスペクト比の厚い分極反転構造を形成することも可能である。

【0115】しかし、多重パルス電界印加においては、例えば、量産時の工程に必要になる処理時間の短時間化という観点から考えた場合、できるだけ印加回数を少なくすることが望ましい。そこで、本願発明者は、短パルス電界印加において、電極構造に依存して形成される電界分布について、更に検討した。

【0116】具体的には、本実施形態で述べた分極反転構造方法において、（1）分極反転構造の成長方向の電界ベクトルを大きくすることにより、多重パルス電界印加において、1回の印加あたりに形成される分極反転構造を大きくする（すなわち印加回数を少なくする）、

（2）均一性の高い分極反転構造を形成する、及び（3）高アスペクト比を有する分極反転構造を形成する、という3つの条件を満たす方法として、図14（a）及び（b）に示す構成を有する電界印加系を用いて、分極反転構造の形成を試みた。図14（a）及び（b）は、本発明の第2の実施形態において、電気的に独立したストライプ状の導電体膜を有する電極構造を用いて多重パルス電界印加を行うことによって、MgO:LN結晶基板内に分極反転構造を形成するための、電界印加系の構成（電極配置）の一例を模式的に示してい

る。

【0117】その結果、この電極構成において、基板の対向する2つの主面にそれぞれ形成された電極に対して、垂直方向に電界印加を行うことにより、少ない電界印加回数で高アスペクト比の厚い分極反転構造を得ることができた。

【0118】図14(a)及び(b)において、59は單一分極化されたXカットのMgO:LN結晶基板、60は、MgO:LN結晶基板59において第1の主面上に形成された周期状パターンを持つ樹形電極、61は、MgO:LN結晶基板59において第2の主面上に形成された電極、62は、MgO:LN結晶基板59において第1の主面上に形成された導電性膜、63は、電極60及び導電性膜62を含むMgO:LN結晶表面を覆うように形成された絶縁膜、64は電源である。また、65は、形成される分極反転構造である。このとき、樹形電極60の電極指の周期は、形成される分極反転構造65の周期と対応している。また、導電性膜62は、ストライプ状の形状を有しており、電界印加時には、電源64、樹形電極60、及び電極61の何れとも結線されていない。樹形電極60及び導電性膜62の位置関係としては、樹形電極60がMgO:LN結晶基板59の+C軸側に配置されており、導電性膜62は-C軸側に配置されている。なお、図14(a)及び(b)に示される構成における樹形電極60、電極61、及び導電性膜62は、すべてTaで形成し、それらの厚さを何れも1000Åとした。また、絶縁膜63の材料はSiO₂であり、厚さを2000Åとした。

【0119】なお、図14(b)においては、樹形電極60は複数の樹形電極の列から構成されており、ストライプ状の導電性膜62は、各樹形電極に対して一対一に対応するように配置されている。

【0120】以上のような構成において、樹形電極60と電極61との間に多重パルス電界印加を行うことにより、(1) 形成される分極反転構造65の周期方向への広がりを抑えて、高アスペクト比の分極反転構造65を均一に形成することが可能であり、また、(2) 電界印加時に形成される電界分布の分極方向電界ベクトル成分を大きくすることが可能になり、導電性膜62がない場合に比べて、少ない印加回数で厚い分極反転構造65を得ることができる、という利点が得られる。分極方向の電界ベクトル成分が大きくなるのは、電界印加に使用する樹形電極60の近傍に電気的に独立した導電性膜62(金属をはじめとする導電性材料の膜)が存在することにより、電界印加時に形成される電界分布が変化することに起因する。これにより、樹形電極60の電極指に沿った分極方向の広い領域において分極反転構造65が発生し、多重パルス電界印加において、少ない印加回数で厚い分極反転構造65を形成することが可能になる。また、分極反転構造65を形成する主たる電界成分

となるのは、分極方向とほぼ垂直な電界成分であるため、本発明の第1の実施形態で示したように、結晶破壊が生じることなく、高アスペクト比の均一な分極反転構造の形成が可能である。

【0121】図14(b)においても同様の分極反転構造の形成が可能であり、複数の周期状の分極反転構造の列を同時に形成することができる。

【0122】以上のような図14(a)及び(b)の何れの配置においても、導電性膜62(金属をはじめとする導電性材料の膜)を形成する材料としては、Ta(タンタル)、Al(アルミニウム)、Cu(銅)、Au(金)、Ag(銀)等をはじめとする導電性材料の利用が可能であるが、特に抵抗率が $1.0 \times 10^{-7} \Omega \text{m}$ 以下の材料を用いると、先に第1の実施形態で樹形電極2及び電極3に関連して説明したように、電界印加時の電界強度分布を均一にして、形成される分極反転構造65の均一性を高めることができる。また、特に、導電性膜62の抵抗値が、測定位置に依存せずに、その何れの部分においても 200Ω を超えないようにすることにより、上記の均一性を更に向上することができる。

【0123】更に、図14(a)及び(b)の何れの配置においても、導電性膜62と樹形電極60との間の間隔を $200 \mu\text{m}$ よりも大きく設定すれば、より大きなサイズを有する分極反転構造65の形成が可能になると共に、電界印加時に導電性膜62と樹形電極60との間で絶縁破壊が生じて放電が発生することを防ぐことができて、好ましい。

【0124】なお、本実施形態においては、MgO:LN結晶基板25として單一分極化されたXカットのMgO:LN結晶基板を用いたが、Yカット基板やオフカット基板を用いた場合においても、同様の方法により、均一で厚い分極反転構造の形成が可能である。

【0125】また、MgO:LN結晶基板25として、液相成長により形成されたMgO:LN結晶膜を用いた場合においても、同様の分極反転構造の形成方法が適用可能であり、均一で厚い分極反転構造が形成できる。液相成長により形成した結晶膜は、通常の結晶に比べ機械的強度が弱いという欠点がある。これは、基板結晶と液相成長結晶との間での格子定数のミスマッチに起因する。この機械的強度の問題が、従来の電界印加による分極反転構造の形成法において、電界印加時に結晶破壊が生じる原因になっていた。これに対して、前述したように、本発明の分極反転構造の形成方法を用いる場合には、電界の集中を防止して結晶破壊を防止することができるため、液相成長の結晶膜にも分極反転構造の形成が可能になる。この場合には、MgO:LN結晶基板に比べて安価な基板、例えばLiNbO₃結晶基板の表面に、数 μm ~数 $10 \mu\text{m}$ の厚さでMgO:LN結晶膜を形成することができ、低コスト化を図ることができるという利点も有している。また、更に、液相成長により形

成されたMgO:LN結晶膜においては、結晶膜の組成比を比較的自由に操作・選択することが可能であり、例えば耐光損傷性が大きいといわれるストイキオメトリーリンジング構造（組成比がLi:Nb=1:1の結晶）が容易に形成できるという長所も有する。

【0126】なお、本実施形態においては、周期状の分極反転構造の形成について述べたが、例えばMgO:LN結晶の+C軸側に配置する電極として、電極の少なくとも一部を尖塔部形状にしたもの用いることにより、その尖塔部の先端直下より分極反転構造を形成することができ、任意の場所に高アスペクト比の分極反転構造を形成することができる。

【0127】また、本実施形態においては、強誘電体結晶の分極方向に電極を形成して電界印加を行う場合について説明したが、第1の実施形態で示したように、分極方向と垂直な方向に電極を形成した場合においても、本実施形態で述べた短パルスの多重パルス電界印加を行うことにより、高アスペクト比で厚い分極反転構造の形成が可能である。

【0128】（第3の実施形態）本実施形態においては、MgO:LN結晶基板のZカット基板において、対向する主面に電極対を形成し、これらの電極対の間にパルス電界を複数回繰り返し印加する。この方法を用いることにより、電極間に沿った所望の広い領域に、周期状の分極反転構造を形成することができる。

【0129】図8(a)は、MgO:LN結晶のZカット基板に分極反転構造を形成する従来の電界印加系（電極配置）を模式的に説明するための斜視図である。また、図8(b)は、図8(a)を-Y面から見た場合の断面図である。

【0130】MgO:LN結晶のZカット基板においては、結晶基板の分極方向が基板表面と垂直方向にある。このため、図8(a)及び(b)に示すように、従来の電界印加による分極反転構造の形成方法においては、結晶基板の対向する2つの主面に電極対を形成し、分極反転構造を形成してきた。

【0131】図8(a)及び(b)において、31は單一分極化されたZカットのMgO:LN結晶基板、32は、MgO:LN結晶基板31の+C軸側の主面に形成された周期状パターンを持つ樹形電極32aとMgO:LN結晶基板31の-C軸側の主面に形成された電極32bとからなる電極対、33は、樹形電極32aを含むMgO:LN結晶基板31の第1の主面を覆うように形成された絶縁膜であり、また、34は電源、35は形成される周期状の分極反転構造である。このとき、樹形電極32aの電極指周期は、形成される分極反転構造35の周期に対応している。また、電極32bの面積は、少なくとも樹形電極32aの面積よりも大きく、かつ電極32bの位置が、樹形電極32aを第2の主面に投影した位置を含まないMgO:LN結晶基板31の-C軸側主面上に配置されている。図中のAは、この電極32bと樹形電極32aとの間の配置ずれの大きさを表している。なお、電源34は、印加電圧及び印加時間を制御することが可能なパルス電界発生源である。

間を制御することが可能なパルス電界発生源である。

【0132】本願発明者の検討により、このような従来の系において、例えば第1の実施形態或いは第2の実施形態で述べたような多重パルス電界印加を用いて分極反転構造35を形成する場合には、印加回数が増加するにつれて、電極間に沿って、分極反転構造の形成領域が拡大されることがわかった。しかし、上記の従来の系においては、電極間に沿って広い領域に分極反転構造を形成することは、困難であった。これは、分極反転構造35が、MgO:LN結晶基板31の厚さ方向に成長するため、電極指の先端直下の結晶基板31の+C軸側主面に発生して-C軸方向に向かって成長した分極反転構造35が-C軸側の主面(-C軸側の電極)に到達した瞬間に、電極間が導通した状態になり、分極反転構造35の成長が止まるためであるということが明らかになった。

【0133】そこで、本実施形態では、図9(a)及び(b)に示すような電界印加系（電極配置）として、この構成で多重パルス電界印加を行うことにより、上記の課題の解決を図った。

【0134】図9(a)は、本発明の第3の実施形態として、ZカットのMgO:LN結晶基板に分極反転構造を形成するための電界印加系の構成（電極配置）の一例を、模式的に説明するための斜視図である。また、図9(b)は、図9(a)を-Y面から見た場合の断面図である。

【0135】図9(a)及び(b)において、36は、單一分極化されたZカットのMgO:LN結晶基板、37aは、MgO:LN結晶基板36の+C軸側の主面に形成された周期状パターンを持つ樹形電極、37bは、

38は、樹形電極37aを含むMgO:LN結晶基板36の第1の主面を覆うように形成された絶縁膜である。また、39は電源、40は、形成される周期状の分極反転構造である。このとき、樹形電極37aの電極指の周期は、形成される分極反転構造40の周期に対応している。また、電極37bの面積は、少なくとも樹形電極37aの面積よりも大きく、かつ電極37bの位置が、樹形電極37aを第2の主面に投影した位置を含まないMgO:LN結晶基板36の-C軸側主面上に配置されている。図中のAは、この電極37bと樹形電極37aとの間の配置ずれの大きさを表している。なお、電源39は、印加電圧及び印加時間を制御することが可能なパルス電界発生源である。

【0136】本実施形態においては、MgO:LN結晶基板36として厚さ約500μmのZカット基板を用い、樹形電極37aの電極指は、長さ40～250μm、幅1μm、周期3μmで形成した。また、電極37bは、樹形電極37aを第2の主面に投影した位置よりも0～100μmずらして（すなわちA=0～100μmとして）配置した。

【0137】樹形電極37a及び電極37bを形成する材料としては、Ta(タンタル)、Al(アルミニウム)、Cu(銅)、Au(金)、Ag(銀)等をはじめとする導電性材料の利用が可能であるが、特に抵抗率が $10 \times 10^{-8} \Omega \text{m}$ 以下の材料を用いることにより、電界印加時の電極直下の電界強度分布を均一にすることができるため、形成される分極反転構造40の均一性を高めることができる。以下の本実施形態の説明においては、Ta電極を用いた場合について説明する。このとき、電極37a及び37bの厚さを数 100 \AA ~ 3400 \AA とし、また、絶縁膜38は、例えばSiO₂やNb₂O₅などを用いて、樹形電極37a及びMgO:LN結晶基板36の第1の主面を完全に覆うように被着形成する。絶縁膜38の厚さは、電極厚さよりも十分大きくなるように数 100 \AA ~ 3000 \AA とする。

【0138】以上のような装置構成による本実施形態の分極反転構造の形成方法について、以下でその動作を述べる。

【0139】樹形電極37a及び電極37bは、蒸着やスパッタリング等によりMgO:LN結晶基板36表面にTa薄膜を製膜し、フォトリソグラフィープロセス及びエッチャリングプロセス、或いはリフトオフ等を用いることにより、容易に形成することができる。絶縁膜38の被着形成も、スパッタリング等を用いることにより、容易に実現できる。このようにして形成された電極37a及び37bを介して、電源40を用いてMgO:LN結晶基板36に対して多重パルス電界印加を行うことにより、樹形電極37aの電極指に沿って分極反転構造の形成領域を拡大することができ、Zカット基板において、均一性の高い周期状の分極反転構造40を広範囲に形成することができる。電界印加にあたっては、不活性絶縁液の中で、MgO:LN結晶基板36の上に被着形成された樹形電極37a及び電極37bに、絶縁膜38を介して外部電極を接触させ、これらの電極37a及び電極37bを介して、電源39からのパルス電界をMgO:LN結晶基板36に印加する。具体的には、MgO:LN結晶基板36の+C軸側に配置された樹形電極37aの電位が、-C軸側に配置された電極37bの電位よりも高くなるようにして、印加電圧が数kV/mm~数 10 kV/mm で印加時間が 20 ms 以下のパルス電界を複数回印加することにより、電界印加を行う。

【0140】前述したように、MgO:LN結晶のZカット基板において分極反転構造40を形成する場合、分極反転構造40がMgO:LN結晶基板36の厚さ方向に成長する。このため、-C軸側の主面上の電極37bが、+C軸側の樹形電極37aを-C軸側の面へ投影した位置と重なっている場合には、MgO:LN結晶基板36の+C軸側の主面に発生して-C軸方向に向かって成長した分極反転構造40の一部が-C軸側の主面(-C軸側の電極)に到達した瞬間に、樹形電極37aと電

極37bとが導通した状態になり、分極反転構造40の成長が止まってしまうという問題があった。このような場合には、電極指の長さ $250 \mu\text{m}$ に対して、電極指に沿った分極反転構造の形成領域の広がりの大きさは約 $40 \mu\text{m}$ 程度であった。

【0141】これに対して、本実施形態では、上記のように、-C軸側の主面に形成される電極37bを樹形電極37aの投影位置と重ならないように配置することによって、上記のような導通状態を回避することができる。この結果、多重パルス電界印加を行ったときの電極指に沿った分極反転構造の形成領域を拡大することができる。特に、樹形電極37aと電極37bとの配置ずれの大きさAを $20 \mu\text{m}$ 以上にすることにより、電極指の長さ $250 \mu\text{m}$ に対して、分極反転構造の形成領域の広がりを、電極指に沿って $100 \mu\text{m}$ 以上にすることができる。なお、上記のように電極37bを樹形電極37aの投影位置から離れた位置に配置することにより、図9に示した従来の電極配置の場合に比べて、MgO:LN結晶基板36の分極方向に形成される電界強度はわずかに弱くなるが、電界の分極方向成分の大きさは、分極反転構造40の形成に十分な大きさである。

【0142】本実施形態では、分極反転周期が約 $3 \mu\text{m}$ 、分極反転構造40の周期方向の幅が $1.5 \mu\text{m}$ 、電極指に沿った方向の分極反転構造の広がりが $100 \mu\text{m}$ である場合に、 $500 \mu\text{m}$ 厚の基板の+C面から-C面まで、均一な周期状の分極反転構造40を形成することができた。

【0143】上記のような分極反転構造40の成長による電極間の導通状態を回避する方法として、例えば、電極37bをMgO:LN結晶基板36の-C軸側の主面上に形成する際に、電極37bとMgO:LN結晶基板36との間に絶縁材料を被着形成してもよい。例えば、SiO₂等をスパッタにより被着することで、上記の目的的絶縁膜を容易に形成することができる。また、この際には、分極反転構造の形成のための印加電圧を多少大きくする必要があるものの、均一な周期状の分極反転構造40を形成することができる。具体的には、電極指の長さ $250 \mu\text{m}$ に対して、分極反転構造の形成領域の電極指に沿った広がりを、 $80 \mu\text{m}$ 以上にすることができる。

【0144】(第4の実施形態) 本実施形態においては、上述の第1~第3の実施形態に示した方法を用いて形成した周期状の分極反転構造と光導波路とを用いて、高変換率の波長変換素子を作製する方法について、詳しく説明する。

【0145】周期状の分極反転構造を利用して波長変換を行う波長変換素子には、大きく分けて、光導波路型波長変換素子とパルク型波長変換素子とがある。

【0146】光導波路型波長変換素子の場合には、MgO:LN結晶中に光導波路を形成し、この光導波路に基

本波となるレーザ光を入射して、波長変換を行う。このとき、高効率の波長変換を行うためには、光導波路中を伝搬する導波光と周期状の分極反転構造との間に、十分なオーバーラップをとる必要がある。また、光導波路型波長変換素子及びバルク型波長変換素子の両方において、分極反転部と非分極反転部との割合(デューティー比)が1:1に近いほど、擬似位相整合状態が良好に形成されていることになり、これも、高変換効率をもたらす要因の一つとなっている。

【0147】更に、例えば発生される高調波を光ディスク用光源として用いる場合においては、波長広がりが小さいことが望まれる。また、大きな波長広がりは、変換効率の低下の原因にもなる。従って、波長変換により得られる高調波の波長広がりを小さくするために、形成される分極反転周期が均一であることが重要である。

【0148】そこで、本発明の分極反転構造の形成方法を用いて形成した周期状の分極反転構造を用いて、波長変換素子を作製し、その特性を評価した。図10には、本発明の第4の実施形態において形成される光導波路型波長変換素子の構成の一例を示す。

【0149】図10において、41は、強誘電体結晶基板410としてのオフカットのMgO:LN結晶基板410に作製された光導波路型波長変換素子であり、42は周期状の分極反転構造、43は光導波路である。このとき、周期状の分極反転構造42の周期方向と光導波路43の導波方向とがほぼ平行になるように配置され、光導波路43の中を伝搬する導波光とMgO:LN結晶410との非線形相互作用により、波長変換が行われる。また、光導波路43の端面(MgO:LN結晶410の端面411及び412)は、周期状の分極反転構造42の周期方向とほぼ垂直になるように、研磨されている。なお、本実施形態においては、光導波路型波長変換素子41の作用長は10mmとした。

【0150】以上のように構成された波長変換素子41について、以下では、その動作を述べる。

【0151】光導波路43は、蒸着やスパッタリング等によりMgO:LN結晶基板410の表面にTa薄膜を製膜し、フォトリソグラフィープロセス及びエッチングプロセスによって所定の導波路パターンにバーニングした上で、この状態のMgO:LN結晶基板410を高温の安息香酸やビロ磷酸等に浸してアニール処理を施すことにより、形成することができる。例えば、光導波路43の幅を5μm、基板厚さ方向での深さを2.5μmとする。このとき、形成される周期状の分極反転構造42の厚さは、電極指の先端部の分極反転領域において最も大きく、反転の成長方向に向かって徐々に小さくなるので、光導波路43と周期状の分極反転構造42とが十分重なるようにするためには、周期状の分極反転構造42の形成に用いたパターン電極の電極指先端と光導波路パターンとの間の距離が、小さい方がよい。また、電極

形成部分は、エッチングプロセス等により基板表面が不均一になっているため、導波ロスが大きい。従って、具体的には、電極指先端と光導波路43との間の距離は、0~10μmであることが望ましい。具体的には、周期状の分極反転構造42を、第1の実施形態で述べた多重パルス電界印加を用いる方法により形成した場合には、分極反転周期が3μm、分極反転部の周期方向の広がり(以下、「分極反転幅」と称する)が約1.5μm、分極反転部の厚さが約1.5μmである、均一な周期状の分極反転構造が得られた。

【0152】更に、上記のようにして周期状の分極反転構造42及び光導波路43を形成した後に、導波方向とほぼ垂直になるようにMgO:LN結晶基板410の端面411及び412を研磨する。その後、研磨された端面411及び412にスパッタリングによって反射防止膜(ARコート)を形成して、光導波路型波長変換素子41を作製する(但し、図中に反射防止膜は不図示である)。上記の反射防止膜としては、例えば、SiO₂膜を用いることができる。

【0153】このようにして形成された光導波路型波長変換素子41においては、厚さ方向に約2.5μmの光導波路を導波する導波光と周期状の分極反転構造とのオーバーラップが向上されて、波長変換効率が大幅に向上される。

【0154】この光導波路型波長変換素子41を用いて、図11に示すような高調波発生光源を構成する。図11において、44は図10に示す光導波路型波長変換素子であり、45は周期状の分極反転構造、46は光導波路である。また、47はレーザ光源、48はレーザ光源47からのレーザ光、49は光導波路型波長変換素子44により得られるレーザ光48の高調波である。また、50は、レーザ光48を光導波路46に入射するためのカップリングレンズである。

【0155】このようにして構成された高調波発生光源の光学系において、光導波路型波長変換素子44の特性を評価したところ、従来の光導波路型波長変換素子において800%/W程度であった規格化変換効率が、1200%/W以上に向上することが確認された。また、均一な周期状の分極反転構造45により、出射高調波49の波長広がりを、半値全幅で1.0nm以下に抑えることができた。

【0156】更に、第1の実施形態で述べたように、MgO:LN結晶基板の対向する主面に電極対を形成し、これらの電極対の間にパルス電界を複数回繰り返し印加する方法によって周期状の分極反転構造を形成すると、3°カットX基板に、周期3μm、厚さ2.2μm以上、分極反転幅1.5μmの周期状の分極反転構造を形成することができる。このようにして形成される周期3μmで厚さ2μm以上の周期状の分極反転構造を利用することにより、図11に示す光導波路型波長変換素子4

4において、最も効率の良い疑似位相整合状態を実現し、かつ、光導波路4 6の断面と分極反転部分4 5との重なり（オーバーラップ）を大きくすることができる。この結果、より高効率の波長変換を実現することが可能になり、具体的には、規格化変換効率として1800%／W以上の値が得られた。また、均一な周期状の分極反転構造4 5によって、出射高調波4 9の波長広がりを、半值全幅で1.0 nm以下に抑えることができた。

【0157】更に、強誘電体結晶基板としてMgO:LN結晶基板を用いる場合には、耐光損傷性が高い光導波路型波長変換素子を作製することができて、高出力で且つ高変換効率を有する波長変換素子を作製することができる。

【0158】或いは、上記のような光導波路型の波長変換素子に代えて、バルク型波長変換素子として、本発明の第3の実施形態で示した方法に従ってZカット基板に周期状の分極反転構造を形成し、これをを利用して波長変換素子を作製してもよい。図12は、そのようにして形成されるバルク型波長変換素子5 1の構成の一例を示す斜視図である。

【0159】図12において、5 1は、強誘電体結晶基板5 10としてのMgO:LN結晶基板5 10に作製されたバルク型波長変換素子であり、5 2は周期状の分極反転構造である。このとき、MgO:LN結晶基板5 10の端面5 11及び5 12は、周期状の分極反転構造5 2の周期方向とほぼ垂直になるように研磨されている。この研磨された一方の端面5 11から入射してMgO:LN結晶基板5 10の内部を伝搬する導波光と、MgO:LN結晶基板5 10との非線形相互作用により、波長変換が行われる。波長変換の結果として得られた光は、結晶基板5 10の他の端面5 12から出射される。

【0160】以上のように構成されたバルク型波長変換素子5 1について、以下でその動作を述べる。

【0161】周期状の分極反転構造5 2を第3の実施形態で示した方法により形成すると、分極反転構造としては、周期3 μm、分極反転幅1.5 μm、及び断面積100 μm × 500 μm以上の面状の均一な周期状の分極反転構造5 2が得られる。このようにして周期状の分極反転構造5 2を形成した後に、周期状の分極反転構造5 2の周期方向とほぼ垂直になるようにMgO:LN結晶基板5 10の端面5 11及び5 12を研磨する。その後に、スパッタリングにより、研磨された端面5 11及び5 12に反射防止膜（ARコート）を形成して、バルク型波長変換素子5 1を作製する（但し、図中に反射防止膜は不図示である）。なお、本実施形態においては、反射防止膜として、例えばSiO₂膜を用いることができる。

【0162】このバルク型波長変換素子5 1を用いて、図13に示すような高調波発生光源を構成する。図13において、5 3は図12に示すバルク型波長変換素子で

あり、5 4は周期状の分極反転構造である。また、5 5はレーザ光源、5 6はレーザ光源5 5からのレーザ光、5 7はバルク型波長変換素子5 3により得られるレーザ光5 6の高調波である。また、5 8は、レーザ光5 6をバルク型波長変換素子5 3のMgO:LN結晶基板の端面に入射するためのカップリングレンズである。

【0163】このようにして構成された高調波発生光源の光学系において、バルク型波長変換素子5 3の特性を評価したところ、従来のバルク型波長変換素子において800%／W程度であった規格化変換効率が、1200%／W以上に向上することが確認された。また、均一な周期状の分極反転構造5 4により、出射高調波5 7の波長広がりを、半值全幅で1.0 nm以下に抑えることができた。

【0164】更に、強誘電体結晶基板としてMgO:LN結晶基板を用いる場合には、耐光損傷性が高い光導波路型波長変換素子を作製することができて、高出力で且つ高変換効率を有する波長変換素子を作製することができる。

【0165】

【発明の効果】以上のように、本発明によれば、電界印加による分極反転構造の形成方法において、強誘電体結晶基板の対向する2つの主面に對をなす電極（電極対）を形成し、これらの電極対を介して電界印加を行うことにより、分極反転構造のための高電圧の電界印加による結晶破壊を、緩和することができる。これにより、高電圧の電界を印加する際に、結晶破壊を防止しながら厚い分極反転構造を形成することが可能になる。また、結晶表面に存在する不純物などに起因する放電も、防止される。これらにより、本発明によれば、電界印加時に生じる強誘電体結晶基板の絶縁破壊を大幅に低減することができて、分極反転構造の形成の歩留まりが、従来に比べて一桁以上向上される。

【0166】また、強誘電体結晶基板の対向する2つの主面に對をなす電極（電極対）を形成することにより、配置する電極列の間隔を小さな値に設定することが可能になる。具体的には、この電極列間の間隔を50 μm～400 μmの間で選択することで、周期状の分極反転構造の集積度を向上することができる。これにより、例えばウエハ状の結晶基板から光導波路型波長変換素子を作製する場合に、同一結晶基板から作製可能な素子の数を、従来の4倍以上にすることができる。

【0167】また、本発明の分極反転構造の形成方法によれば、結晶基板の対向する主面に電極対（正負電極）を形成するため、構造的に電極バターニングの不良による正負電極の接触がない。このため、例えば、ウエハ全面に一度に電界印加を行って、分極反転構造を広範囲に渡って同時に形成することが可能である。これにより、1プロセスで広範囲に渡って同時に分極反転構造の形成を行うことにより、分極反転構造の形成のスループット

を大幅に向上することができる。

【0168】或いは、本発明によれば、強誘電体結晶基板の同一主面上に形成された電極対を介して電界印加を行って分極反転構造を形成する場合に、印加パルス電界波形の制御が可能になり、更に、多重パルス電界印加を行うことにより、高アスペクト比を有して且つ厚い周期状の分極反転構造を形成することが可能になる。上記において、印加パルス電界波形の制御により、結晶基板内に生じる電界分布をコントロールすることが可能になる。特に、短パルス電界印加を行うことで、形成される分極反転部の周期方向への広がりを抑えるという効果がある。また、多重パルス電界印加を行うことにより、形成される分極反転部の厚さを増すことが可能になる。更に、短パルス電界の印加による他の効果として、形成される分極反転構造の均一性が向上される。

【0169】また、本発明の分極反転構造の形成方法によれば、通常の結晶に比べて機械的強度が弱い液相成長結晶膜にも、分極反転構造を形成することが可能になる。これにより、安価な基板の表面に数 μm ～数 $10\text{ }\mu\text{m}$ の厚さで所望の強誘電体結晶膜を形成することが可能になり、例えば、上記のような液相成長結晶膜を用いて光導波路型波長変換素子を作製する場合に、低コスト化を図ることができる。

【0170】更に、本発明によれば、結晶基板主面とほぼ垂直な方向に單一分極化された強誘電体結晶基板に分極反転構造を形成する形成方法において、-C軸側の主面に形成される電極を+C軸側の主面に形成される電極の投影位置と重ならないように配置することにより、分極反転構造の成長に起因する電極間の導通状態を回避することが可能になる。これにより、多重パルス電界印加時に、電極間に沿って分極反転構造の形成領域を拡大することができる。

【0171】また、本発明に示した分極反転構造の形成方法を用いて光導波路型波長変換素子を作製することにより、高アスペクト比を有し且つ厚い周期状の分極反転構造の形成が可能になる。この結果、従来に比べて、非常に高い規格化変換効率を得ることができる。これにより、例えば小型の波長変換型短波長光源として、出力 100 mW の赤外半導体レーザ光を基本波として、約 20 mW の高調波出力光を得ることが可能になる。

【0172】また、本発明に示した分極反転構造の形成方法を用いてバルク型波長変換素子を作製することにより、分極反転周期 $3\text{ }\mu\text{m}$ 、分極反転幅 $1\text{. }5\text{ }\mu\text{m}$ 、断面積 $100\text{ }\mu\text{m}\times 500\text{ }\mu\text{m}$ 以上の面状の均一な周期状の分極反転構造の形成が可能になる。これにより、高変換効率を有し且つ高出力のバルク型波長変換素子を得ることが可能になる。

【0173】また、本発明の分極反転構造の形成方法は、強誘電体結晶基板として MgO ドープ LiNbO_3 、結晶基板を用いる場合にも適用可能であり、この場合に

は、耐光損傷性が高い光導波路型波長変換素子及びバルク型波長変換素子の作製が可能である。

【図面の簡単な説明】

【図1】(a)は、本発明の第1の実施形態における、オフカット強誘電体結晶基板に分極反転構造を形成するための電界印加系の構成を模式的に示す斜視図であり、(b)は、(a)を-Y面から見た場合の断面図である。

【図2】本発明の第1の実施形態において、強誘電体結晶基板の分極方向と垂直な方向に配置された電極を用いて電界印加を行う際に形成される電界の様子を模式的に示す図である。

【図3】(a)は、従来の分極反転構造の形成方法の場合における電界印加系の構成の一例を模式的に示す図であり、(b)は、本発明の第1の実施形態に従った分極反転構造の形成方法の場合における電界印加系の構成を模式的に示す図である。

【図4】本発明の第2の実施形態において、Xカット強誘電体結晶基板に、同一主面内の分極方向に配置されている電極対を用いて分極反転構造を形成するための電界印加系の構成を模式的に示す図である。

【図5】本発明の第2の実施形態の方法に関連して、形成される分極反転構造のアスペクト比及び基板厚さ方向への分極反転部の厚さと印加パルス電界のパルス幅との関係を示す図である。

【図6】本発明の第2の実施形態の方法に関連して、多重パルス電界印加の印加回数と分極反転部の厚さとの関係を示す図である。

【図7】本発明の第2の実施形態において、Xカット強誘電体結晶基板に2次元電界印加法を用いて分極反転構造を形成するための電界印加系の構成を模式的に示す図である。

【図8】(a)は、本発明の第3の実施形態に関連して、従来技術による分極反転構造の形成のための電界印加系の構成の一例を模式的に示す斜視図であり、(b)は、(a)を-Y面から見た場合の断面図である。

【図9】(a)は、本発明の第3の実施形態における分極反転構造の形成のための電界印加系の構成を模式的に示す斜視図であり、(b)は、(a)を-Y面から見た場合の断面図である。

【図10】本発明の第4の実施形態に従って形成される光導波路型波長変換素子の構成を模式的に示す図である。

【図11】本発明の第4の実施形態において、図10の光導波路型波長変換素子を用いて構成される高調波発生光源の構成の一例を模式的に示す図である。

【図12】本発明の第4の実施形態に従って形成されるバルク型波長変換素子の構成を模式的に示す図である。

【図13】本発明の第4の実施形態において、図12のバルク型波長変換素子を用いて構成される高調波発生光

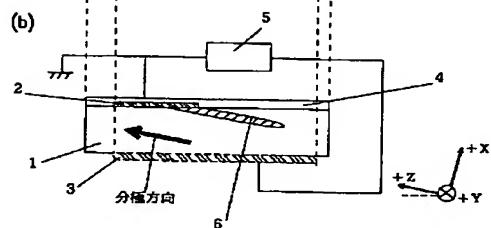
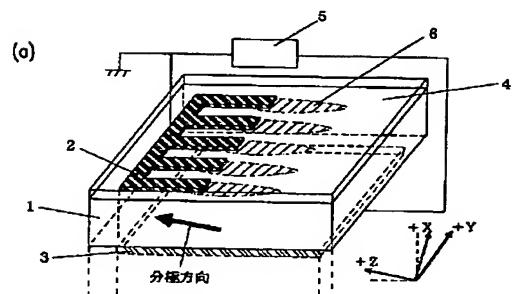
源の構成の一例を模式的に示す図である。

【図14】本発明の第2の実施形態において、電気的に独立したストライプ状の導電性膜を有する電極構造を用いて分極反転構造を形成するための電界印加系の構成を模式的に示す図である。

【符号の説明】

1、7、13、19、25、31、36、59 Mg
 ○: LN結晶基板
 3、8、9、15、17、28、32b、37b、61
 電極
 4、21、27、33、38、63 絶縁膜
 5、10、18、22、29、34、39、64 電源
 6、23、30、35、40、65 分極反転構造
 11 電界
 12、24 分極方向
 20、26、32 電極対
 2、14、16、20a、26a、32a、37a、6*

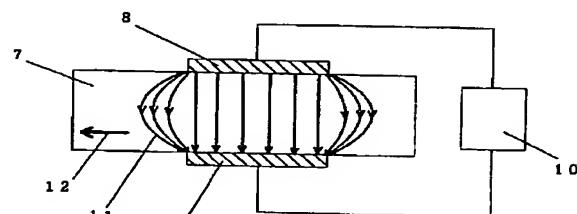
【図1】



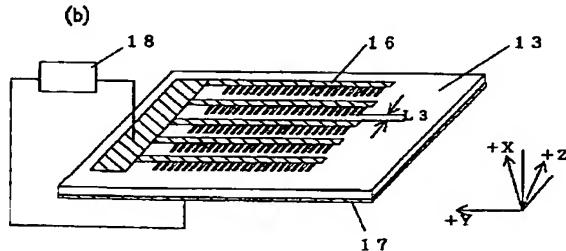
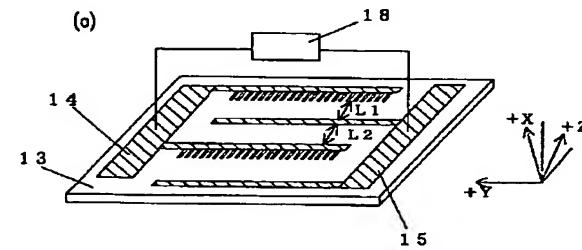
* 0 梯形電極

20b、26b ストライプ電極
 41、44 光導波路型波長変換素子
 42、45、52、54 周期状の分極反転構造
 43、46 光導波路
 47、55 レーザ光源
 48、56 レーザ光
 49、57 高調波
 50、58 カップリングレンズ
 51、53 パルク型波長変換素子
 62 導電性膜
 410、510 強誘電体結晶基板
 411、412、511、512 強誘電体結晶基板の端面
 L1、L2、L3 電極間の間隔
 A 梯形電極37aと電極37bとの間の配置ずれの大きさ

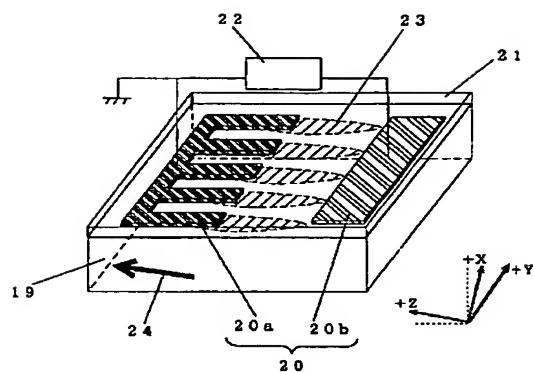
【図2】



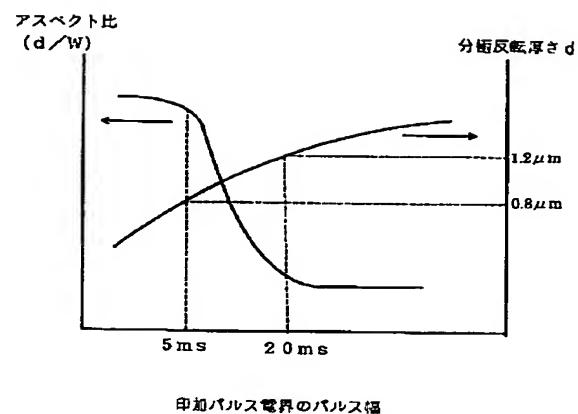
【図3】



【図4】

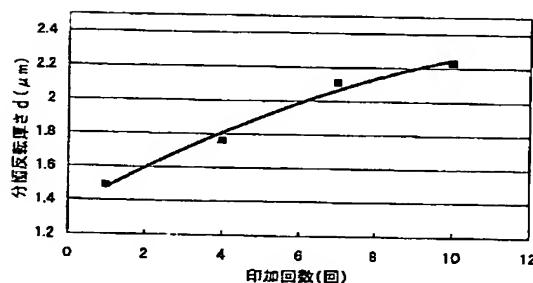


【図5】

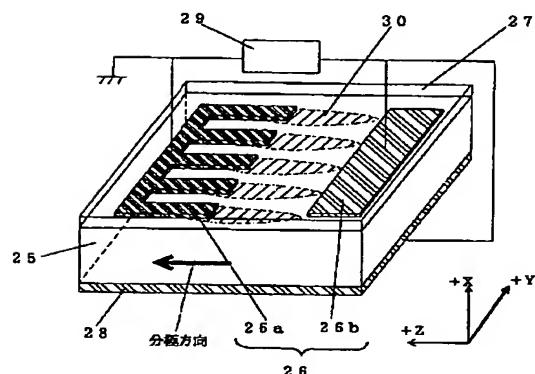


印加パルス電界のパルス幅

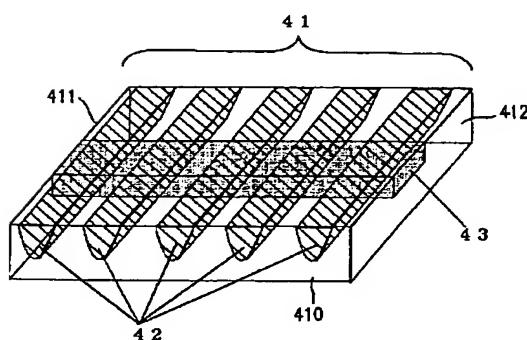
【図6】



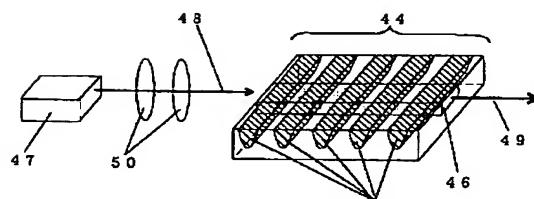
【図7】



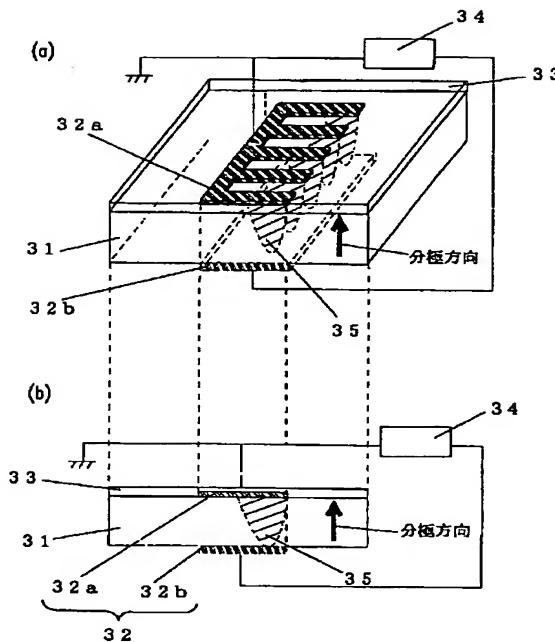
【図10】



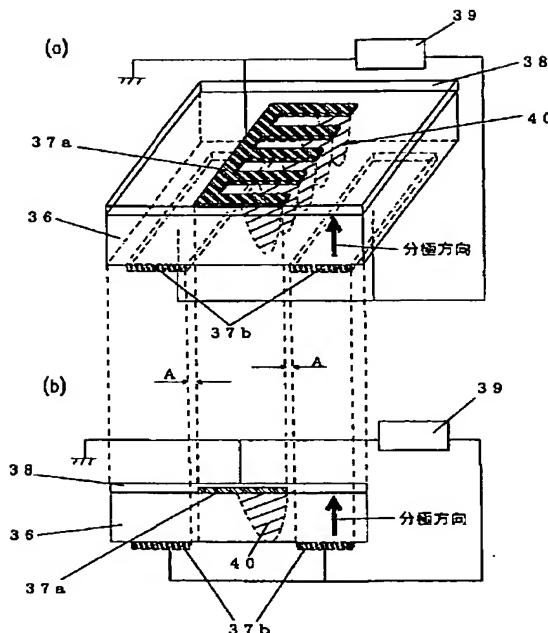
【図11】



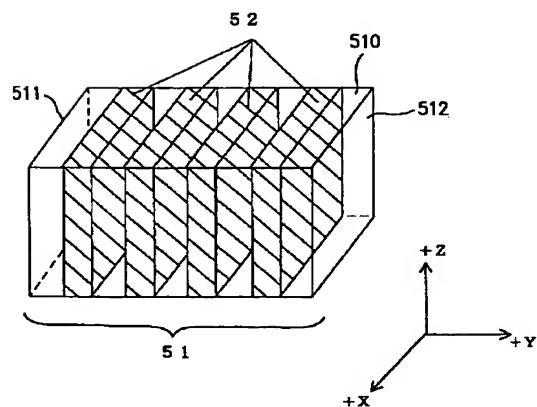
【図8】



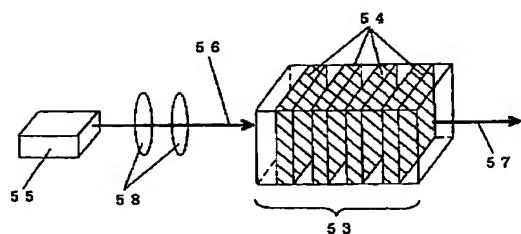
【図9】



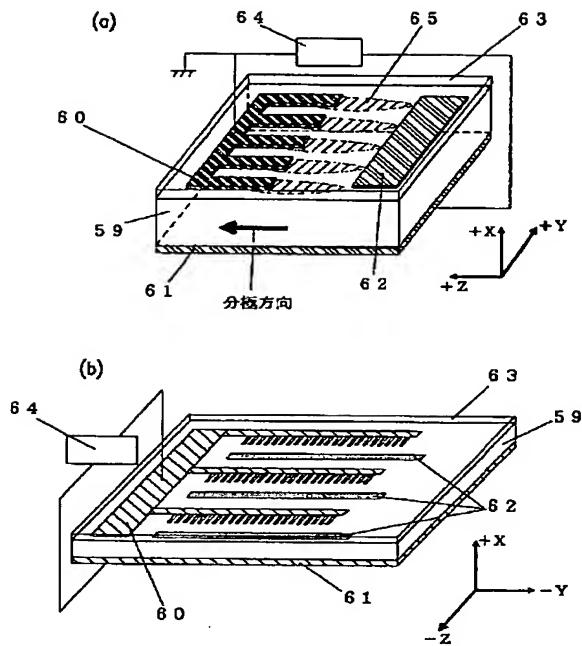
【図12】



【図13】



【図14】



フロントページの続き

(72)発明者 山本 和久

大阪府門真市大字門真1006番地 松下電器
産業株式会社内

F ターム(参考) 2K002 AB12 CA03 FA27 HA20